



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Neemias Almeida Dias

**Determinação de Propriedades Reológicas de Rejeito de
Mineração por meio de Reômetro Rotacional**

Dissertação de Mestrado

Vitória
Junho de 2017

Neemias Almeida Dias

**Determinação de Propriedades Reológicas de Rejeito de
Mineração por meio de Reômetro Rotacional**

Dissertação de Mestrado

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil da Universidade Federal do Espírito
Santo.

Orientador: D. Sc. Patrício José Moreira Pires

Coorientador: D. Sc. Edson José Soares

Vitória

Junho de 2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

D541d Dias, Neemias Almeida, 1990-
Determinação de propriedades reológicas de rejeito de mineração
por meio de reômetro rotacional / Neemias Almeida Dias. – 2017.
90 f. : il.

Orientador: Patrício José Moreira Pires.
Coorientador: Edson José Soares.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Minério de ferro – rejeitos. 2. Barragens e açudes. 3. Minérios de
ferro. 4. Tensão limite de escoamento. 5. Elastoplasticidade. 6.
Reologia. I. Pires, Patrício José Moreira. II. Soares, Edson José. III.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 624

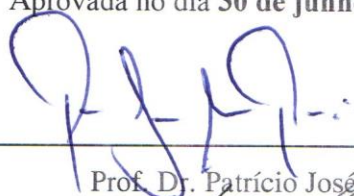
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE REJEITO DE MINERAÇÃO POR MEIO DE REÔMETRO ROTACIONAL

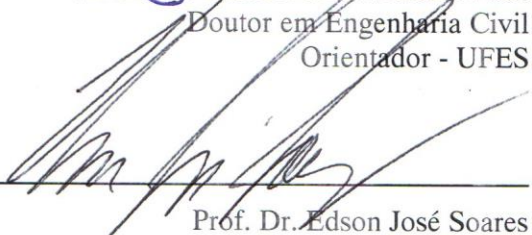
Neemias Almeida Dias

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Estruturas.

Aprovada no dia **30 de junho de 2017** por:



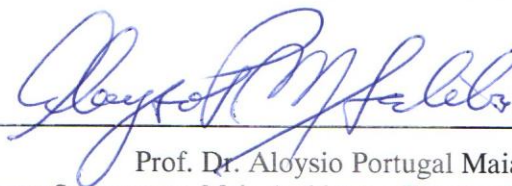
Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires
Doutor em Engenharia Civil
Orientador - UFES



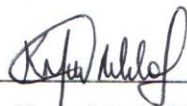
Prof. Dr. Edson José Soares
Doutor em Engenharia Mecânica
Coorientador - UFES



Profa. Ph. D. Jamilla Emi Sudo Lutif Teixeira
Doutora em Engenharia Civil
Membro Interno - UFES



Prof. Dr. Aloysio Portugal Maia Saliba
Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos
Membro Externo - UFMG



Profa. Dra. Karla Maria Wingler Rebelo
Doutora em Geotecnia
Membro Externo - UFES

Vitória – ES, junho de 2017

"Quem quer algo de grande, como diz Goethe, deve saber limitar-se. Quem, pelo contrário, tudo quer, nada, em verdade, quer e nada consegue."

Georg W. F. Hegel

À minha mãe.

Agradecimentos

Agradeço a Deus.

A Dona Dora, por toda a dedicação e empenho para minha formação pessoal e profissional. Mesmo com tudo o que vem ocorrendo nos últimos anos, ainda sinto seu amor de mãe.

A Ingrid, que conheci durante essa trajetória e se tornou uma das bases para que eu me mantivesse seguro nos momentos de aflição. Sempre serei grato por seu amor e companheirismo.

Aos meus tios Esmael, Israel e Marcos por estarem sempre presentes.

Àqueles que foram colegas de graduação e se tornaram os melhores amigos: Douglas, Caio, Mateus, Thiago, Bruno, Gustavo e Robinho. Obrigado pelo companheirismo por esses quase 10 anos.

Murilo, Aline, Marcelo, Rafaely e ao também futuro mestre, Renan, pelos finais de semana descontração, principalmente aqueles em Marechal Floriano.

Ao professor, orientador e amigo Patrício José Moreira Pires por me incentivar e passar a confiança para o desenvolvimento desse trabalho desde o dia em que me foi proposto o tema. Sou grato por ter me iniciado no caminho da pesquisa científica.

Ao professor e coorientador Edson José Soares. A atenção e compartilhamento de conhecimento ao longo dos meses de pesquisa foram primordiais para que eu compreendesse um tema que, a princípio, a mim era desconhecido.

Aos técnicos Adenis e Aldir, providenciais nos momentos de impasses com os equipamentos. Meu muito obrigado, vocês foram indispensáveis para a realização dos meus ensaios.

À Luísa Mazzini, que ignorava as crises alérgicas pelas horas aspirando rejeito e se dedicava a me ajudar nos ensaios.

À Nathalia Couto Machado e ao professor Aloysio Saliba, da UFMG, por fornecerem as amostras utilizadas nesse trabalho e compartilharem o conhecimento a respeito dos rejeitos.

Ao Gabriel Vargas, por todo o suporte e paciência para me sanar dúvidas relacionadas a conceitos e ensaios reológicos.

A todos aqueles presentes diariamente no Laboratório de Geotecnia da UFES, especialmente os técnicos Sid e Natalia; os colegas de mestrado Raphael, Gabriel e Guilherme; e Felipe, engenheiro do Departamento de Engenharia Civil.

Ao professor Marcos Tadeu D'Azeredo Orlando, do Laboratório de Nanometria Fotônica do Departamento de Engenharia Mecânica da Ufes, pelas análises de difração de raio x.

Aos meus grandes amigos do Hax.

A CAPES pelo apoio financeiro.

Resumo

As atividades de mineração no Brasil se iniciaram desde muito tempo, em épocas que remontam cerca de 300 anos atrás. Ainda hoje o país ocupa posição de destaque no setor, sendo o minério de ferro o carro chefe da atividade mineradora com produção bruta de 391 milhões de toneladas em 2016. Desse total, cerca de 65% representam o minério realmente contido no que é extraído. Portanto, o beneficiamento do minério de ferro resulta em alto volume de rejeitos que precisam ser dispostos. Apesar de existirem diversos métodos para depósitos de rejeitos, como o empilhamento a seco, as barragens ainda são as mais utilizadas. Para facilitar o transporte, são transportados hidraulicamente e lançados nos reservatórios. A água contida deve ser adequadamente drenada para evitar excesso de poropressão no maciço e, conseqüentemente, causar instabilidades. Conhecer as propriedades reológicas desses materiais é primordial para os estudos de estabilidade e propagação de onda de ruptura e projetos dos sistemas de bombeamento. No presente trabalho diversos experimentos foram conduzidos em um reômetro de tensão controlada (*stress controlled*) utilizando a geometria *vane*. O material estudado foi proveniente do rejeito após a ruptura da barragem de Fundão, em 2015, e coletado em pontos distintos para analisar a variação das propriedades geotécnicas e reológicas. Diferentes testes reológicos foram empregados: incrementos contínuos de taxa e tensão, fluência e ensaios oscilatórios. Os resultados apontaram que os rejeitos apresentam comportamento viscoelastoplástico e dependência com o tempo, além de variação exponencial da tensão limite de escoamento com a concentração.

Palavras-chave: Barragens de rejeitos. Rejeito de Minério de Ferro. Tensão Limite de Escoamento. Materiais viscoelastoplásticos.

Abstract

Mining activities in Brazil have started a long time ago, in times dating back to 300 years. Currently Brazil still occupies a prominent position in the sector, being the iron ore the flagship of mining activities with gross production of 391 million tons in 2016. Of this total, about 65% represent the ore actually contained in what is mined. Therefore, the processing of the iron ore results in high volume of tailings that needs to be arranged. Although there are several methods to deposit tailings, such as dry stackings, the dams are still the most used. In order to transport them more easily, the tailings are transported hydraulically and thrown in the reservoirs. The contained water must be appropriately drained to avoid excessive pore pressure in the massif and, consequently, cause instabilities. Knowing the rheological properties of these materials is primordial for the studies of stability, wave and rupture propagation and pumping systems design. The present work was developed by means of experiments in a stress controlled rheometer using the vane geometry. The material studied came from the tailings after the rupture of the Fundão dam in 2015 and was collected at different points to analyze the variation of geotechnical and rheological properties. Different kinds of test were employed: continuous ramps of shear rate and shear stress, creep tests and oscillatory tests. The results indicate that the iron ore tailings present viscoelastoplastic and time-dependence behaviours, besides exponential variation of the yield stress as a function of volumetric concentration.

Keywords: Tailings dams. Iron Ore Tailings. Yield Stress. Viscoelastoplastic Materials.

Lista de Figuras

Figura 1 - Número de ocorrências de ruptura em função das causas (adaptado de Azam e Li, 2010).....	26
Figura 2 - Faixas granulométricas dos principais rejeitos das usinas de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero.....	28
Figura 3 – Tensão de escoamento em função da concentração para rejeitos de mineração.....	31
Figura 4 - Alçamento de barragens de rejeito pelos métodos de montante, jusante e linha de centro	32
Figura 5 – Antes e depois da ruptura em (a) (b) Distrito de Bento Rodrigues; (c) (d) Barragem de Santarém	34
Figura 6 – Representação esquemática de fluxo unidirecional entre placas paralelas	35
Figura 7 - Viscosidade em função da taxa de deformação para solução de 0,2% de goma xantana	37
Figura 8 – Modificação gradual da estrutura com o tempo após aplicação de $\tau > \tau_0$ ocasionada por (a) desintegração e (b) reorientação das partículas	38
Figura 9 - Deformação em função do tempo para diferentes tensões de cisalhamento aplicadas em amostras de petróleo parafínico	39
Figura 10 – Modelo SMD: (a) Tensão de cisalhamento em função de acordo com a ; (b) Viscosidade em função da tensão de cisalhamento	41
Figura 11 - Representação esquemática do modelo mecânico de Maxwell	42
Figura 12 - Representação esquemática do modelo mecânico de Kelvin-Voigt	43
Figura 13 - Representação esquemática do modelo mecânico de Jeffreys.....	43

Figura 14 - Curva característica de materiais viscoelastoplásticos	45
Figura 15 - Pontos de coleta das amostras de rejeito.....	47
Figura 16 - Curvas granulométricas das amostras.....	48
Figura 17 - Difratoograma: Ponto P1. Q: Quartzo, H: Hematita.....	50
Figura 18 - Difratoograma: Ponto P2. Q: Quartzo, H: Hematita, G: Goetita.	50
Figura 19 - Difratoograma: Ponto P3. Q: Quartzo, H: Hematita.....	51
Figura 20 – Aspecto das amostras do P1 nas quatro concentrações estudadas	52
Figura 21 – Deslizamento de dispersões causada por afastamento das partículas sólidas em placas paralelas.	53
Figura 22 – Desenho esquemático do reômetro e geometria do <i>vane</i> (dimensões em milímetros).....	54
Figura 23 - Camada de água superficial quando amostra de menor concentração é deixada em repouso.....	55
Figura 24 - Curva de fluxo: óleo de soja	56
Figura 25 – Representação do incremento contínuo	57
Figura 26 - Deformação e tensão durante um ensaio oscilatório	59
Figura 27 - Representações de testes de histerese para materiais tixotrópicos e reopéticos.	61
Figura 28 – Testes de histerese em amostra de óleo parafínico.	62
Figura 29 - Comparação entre os ensaios de fluxo com imposição de taxa e tensão; Ponto P1, $C_v = 48,71\%$	64
Figura 30 - Curvas de fluxo do ponto P1 obtidas por imposição de tensão e ajustes pelo modelo SMD.....	65
Figura 31 - Curvas de fluxo do ponto P2 obtidas por imposição de tensão e ajustes pelo modelo SMD.....	65

Figura 32 - Curvas tensão x deformação do ponto P1 obtidas por incrementos contínuos de taxa.....	66
Figura 33 - Curvas tensão x deformação do ponto P2 obtidas por incrementos contínuos de taxa.....	67
Figura 34 - Tensões de cisalhamento medidas ao longo do tempo para imposição de valores constantes de tensão.....	68
Figura 35 - Deformação ao longo do tempo para tensões impostas (Ponto P1, $C_v = 46,71\%$).....	69
Figura 36 - Deformação ao longo do tempo para tensões impostas (Ponto P2, $C_v = 48,87\%$).....	69
Figura 37 - Deformação ao longo do tempo para tensões impostas (Ponto P1, $C_v = 50,71\%$).....	70
Figura 38 - Deformação ao longo do tempo para tensões impostas (Ponto P2, $C_v = 54,87\%$).....	70
Figura 39 – Taxa de cisalhamento ao longo do tempo para tensões impostas (Ponto P1, $C_v = 50,71\%$).....	72
Figura 40 - Viscosidade ao longo do tempo para tensões impostas (Ponto P1, $C_v = 50,71\%$).....	73
Figura 41 - Varredura de tensão com frequências de 0,1, 0,5 e 1 Hz (Ponto P1, $C_v = 46,71\%$).....	75
Figura 42 - Varredura de tensão com frequências de 0,1, 0,5 e 1 Hz (Ponto P1, $C_v = 50,71\%$).....	75
Figura 43 - G' e G'' em função da frequência	77
Figura 44 - Tempo de retardo em função da frequência.....	78
Figura 45 – Curva de histerese obtida por imposição de Taxa de Cisalhamento (Ponto P1, $C_v = 48,71\%$).....	79

Figura 46 - Curva de histerese obtida por imposição de Taxa de Cisalhamento (Ponto P1, $C_v = 50,71\%$)..... 79

Figura 47 - TLE em função da concentração volumétrica 80

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Principais acidentes de rupturas de barragens no Brasil	24
Tabela 2 – Reservas e produção mundial de minério de ferro em 2016	27
Tabela 3 – Reservas e produção brasileira de minério de ferro em 2015.....	27
Tabela 4 - Etapas de beneficiamento do minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero	28
Tabela 5 - Comparativo de vantagens e desvantagens entre os métodos de jusante e montante.....	32
Tabela 6 - Resumo da caracterização geotécnica das amostras.....	49
Tabela 7 - Classificação dos materiais segundo os sistemas HRB e SUCS	49
Tabela 8 - Teores de umidade, concentrações mássicas e concentrações volumétricas das amostras ensaiadas.....	52
Tabela 9 - Parâmetros do modelo SMD determinados para as diferentes amostras.....	64
Tabela 10 - TLEs obtidas pelos ensaios de fluência.....	73

Lista de Símbolos

Símbolos latinos

A	Área
C_m	Concentração em massa
C_v	Concentração em volume
f	frequência
G	Módulo elástico
G'	Módulo de armazenamento
G''	Módulo de dissipação
G_J	Módulo elástico do modelo de Jeffreys
K	Índice de consistência
M_s	Massa de sólidos
M_t	Massa total da mistura
n	Índice <i>power-law</i>
t	Tempo
TLE	Tensão limite de escoamento
V	Velocidade de deformação
V_t	Volume total da mistura
V_s	Volume de sólidos

Símbolos gregos

δ	Ângulo de fase
ρ_s	Massa específica real dos grãos
γ_s	Peso específico real dos grãos
γ	Deformação
γ_a	Amplitude de deformação
γ_e	Deformação do elemento elástico (mola)
γ_v	Deformação do elemento viscoso (amortecedor)
$\dot{\gamma}$	Taxa de cisalhamento
η	Viscosidade aparente
η_J	Viscosidade do modelo de Jeffreys
θ_1	Tempo de relaxação
θ_2	Tempo de retardo
μ	Viscosidade dinâmica
τ	Tensão cisalhante
τ_0	Tensão limite de escoamento
τ_e	Tensão do elemento elástico (mola)
τ_v	Tensão do elemento viscoso (amortecedor)
τ_{c1}	Primeira tensão crítica de Coussot
τ_{c2}	Segunda tensão crítica de Coussot
ω	Frequência angular

Unidades

Hz Hertz

km Quilômetros

Pa Pascal

s Segundos

Sumário

CAPÍTULO 1	Introdução.....	20
1.1.	Motivação	20
1.2.	Objetivos.....	22
1.2.1.	Objetivo geral	22
1.2.2.	Objetivos específicos.....	23
CAPÍTULO 2	Rejeitos de mineração.....	24
2.1.	Dados sobre a produção de minério de ferro.....	26
2.2.	Barragens de rejeitos de minério de ferro.....	27
2.3.	O caso da ruptura da barragem de rejeitos de Fundão.....	33
CAPÍTULO 3	Reologia.....	35
3.1.	Fluidos não newtonianos	36
3.1.1.	Comportamentos afinante e dilatante	36
3.1.2.	Comportamentos tixotrópico e reopético	37
3.2.	Modelos viscoplásticos.....	39
3.3.	Modelos mecânicos para materiais viscoelásticos	42
3.4.	Comportamento de materiais viscoelastoplásticos.....	44
3.5.	Reologia aplicada a rejeitos de mineração	45

CAPÍTULO 4	Abordagem experimental	47
4.1.	Coleta do material.....	47
4.2.	Caracterização geotécnica e mineralógica.....	48
4.3.	Preparação das amostras.....	51
4.4.	Descrição dos ensaios.....	52
4.4.1.	Ensaio de fluxo	56
4.4.2.	Ensaio de fluência.....	57
4.4.3.	Ensaio oscilatório	57
4.4.4.	Ensaio de histerese.....	60
CAPÍTULO 5	Resultados e discussão	63
5.1.	Ensaio de fluxo	63
5.2.	Relação entre tensão e deformação	66
5.3.	<i>Creep</i> : resposta do material em função do tempo	67
5.4.	Comportamento viscoelástico por ensaios oscilatórios.....	74
5.5.	Análise da reversibilidade do material	78
5.6.	Tensão limite de escoamento em função da concentração volumétrica.....	80
CAPÍTULO 6	Considerações Finais.....	81
6.1.	Conclusões.....	81
6.2.	Sugestões para trabalhos futuros	83
Referências Bibliográficas		84

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1. Motivação

O território brasileiro, ao longo de seus de 8,5 bilhões de km² (IBGE, 2016), apresenta uma vasta diversidade geológica. Tal característica é favorável à existência de jazidas de diferentes minerais. Em face disso, o Brasil tem posição destacável no cenário global de produção mineral, o que a torna uma grande fonte de receita. Segundo o IBRAM (2017), a produção mineral brasileira no ano de 2016 totalizou 24 bilhões de dólares em exportações, sendo o minério de ferro responsável por mais de 13 bilhões.

O desenvolvimento das técnicas e equipamentos de lavra e beneficiamento do minério de ferro possibilita o melhor aproveitamento do teor metálico das jazidas. Por conseguinte, também se presencia o aumento do volume de resíduos gerados. Os resíduos sólidos gerados no decapeamento das jazidas, denominados estéreis, não possuem valor econômico e, geralmente, são dispostos em pilhas ou utilizados em outra etapa da extração de minério. Já os rejeitos que resultam do beneficiamento do minério apresentam metais pesados e, em determinados casos, reagentes (Lozano, 2006).

As empresas mineradoras realizam a disposição dos rejeitos de modo a reduzir os custos e mitigar os impactos ambientais. Para esse fim, as barragens são as estruturas mais utilizadas no Brasil. O entendimento do comportamento reológico dos rejeitos é importante para o controle das quantidades de água e energia despendidas na atividade mineradora. Diminuir a quantidade de água adicionada para transporte dos rejeitos é fundamental para a segurança da barragem. Quanto menor a quantidade de água, menor a poropressão gerada no maciço e maior a capacidade da barragem. Por outro lado, diminuir a quantidade de água também implica na mudança das técnicas de espessamento e transporte – como a utilização de bombas de

deslocamento positivo, transportadores de correia ou caminhões – e pode requerer equipamentos para compactação do material lançado. Assim, água e energia são dois pontos-chaves da atividade mineradora e tem impacto direto no desempenho sustentável e custos de produção das empresas.

Um estudo realizado por Adiansyah *et al.* (2016) com rejeito gerado de uma mina de carvão mostra essa relação entre água e energia. Para isso, os autores utilizaram uma ferramenta de modelagem chamada *Hierarchical Systems Model* (HSM) e estudaram casos com disposição de rejeitos com 30%, 50% e 60% de concentração em massa de sólidos. Os resultados mostraram que os dois últimos casos necessitavam de um consumo de água de 17% e 30% maior em comparação ao primeiro. Todavia, o caso com 50% de teor de sólidos permite melhor reuso da água pelo menor volume relativo de água sobrejacente. Quanto à energia necessária para transporte dos rejeitos, o consumo aumentou com o aumento da concentração. Os casos com 50% e 60% necessitaram, respectivamente, de 53 e 881 vezes mais energia que o de 30%.

As barragens são um tipo de estrutura com potencial risco associado, uma vez que sua ruptura pode levar a impactos ambientais, sociais econômicos e perda de vidas. A lei nº 12334, de 20 de setembro de 2010, estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água ou disposição de rejeitos. Essa lei objetiva, principalmente, garantir os padrões de segurança das barragens, regulamentar as ações de segurança em todas as fases da obra – inclusive durante o planejamento, desenvolvimento do projeto e funcionamento da estrutura – e promover o monitoramento dessas ações.

Embora se saiba da importância da análise da estabilidade das barragens e da previsão do escoamento em caso de ruptura, a incerteza quanto à confiabilidade dos parâmetros empregados deve ser levada em consideração, uma vez que os métodos são diretamente dependentes dos parâmetros em que são fundamentados. Os parâmetros são, principalmente, tamanho e formato dos grãos, peso específico, viscosidade, tensão de escoamento, entre outros (FEMA, 2013). Assim, ao longo do tempo foram criados métodos para previsão de inundação devido à propagação de rejeito.

Jeyapalan *et al.* (1983) desenvolveram um estudo de ruptura de barragem de rejeito para prever, por meio de procedimentos analíticos, características do escoamento e a extensão alcançada pela onda após a ruptura. Os autores utilizaram o modelo de Bingham para analisar o fluxo de

rejeitos na horizontal, em planos inclinados e vales de seção prismática por meio do programa *Tflow*.

Schamber e MacArthur (1985) formularam um modelo unidimensional para corridas escoamento de lama, aplicando o modelo reológico de Bingham. Os autores mais tarde estudaram um escoamento superficial bidimensional com o mesmo modelo reológico (MacArthur e Chamber, 1986).

O algoritmo FLO-2D foi baseado no algoritmo MUDFLOW e sua utilização é indicada pela FEMA. São utilizados parâmetros reológicos – tensão de escoamento e viscosidade – para o cálculo dos três componentes de atrito considerados para a propagação da lama: a tensão limite de escoamento, a tensão viscosa e a tensão turbulenta dispersiva (O'Brien *et al.*, 1993).

Outro método, criado por Hungr (1995), é baseado na solução lagrangeana das equações de movimento. O método permite a escolha de diferentes modelos para representar a resistência ao escoamento do material: plástico, friccional, laminar newtoniano, turbulento, Bingham, viscoso de Coulomb e Voellmy. Além disso, esse método também permite a alteração dos modelos ao longo da massa

Em face da grande utilização das barragens, é imprescindível que existam pesquisas que se proponham a estudar as propriedades reológicas dos rejeitos. Assim, com melhor conhecimento do comportamento reológico desses materiais e a maior exatidão na obtenção dos parâmetros reológicos, pode-se otimizar os projetos dos sistemas de bombeamento de rejeitos e as simulações de previsão de fluxo podem ser melhor ajustadas.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

O alvo principal do presente trabalho é avaliar diferentes métodos para ensaios reológicos em rejeitos de minério de ferro, analisando seu comportamento e propriedades reológicas com o intuito de servir como base para estudos de projetos de disposição e fluxo de rejeitos.

1.2.2.**Objetivos específicos**

- i. Sugerir métodos de execução dos ensaios para determinação de parâmetros reológicos de rejeitos;
- ii. Determinar e comparar a tensão limite de escoamento (TLE ou τ_0) para quatro concentrações volumétricas diferentes por meio de ensaios de fluxo, fluência e oscilatórios;
- iii. Aproximar as curvas de fluxo a modelos reológicos mais regularmente utilizados na literatura;
- iv. Analisar a variação da tensão limite de escoamento em função da concentração volumétrica;
- v. Investigar o comportamento viscoelástico do material por meio de ensaios oscilatórios;
- vi. Inferir a respeito da reversibilidade do material;

CAPÍTULO 2

Rejeitos de mineração

Azam e Li (2010) apontaram que, de um total de 18.401 minas analisadas em todo o mundo entre as décadas de 1910 e 2000, 1,2% apresentaram ruptura. No Brasil ocorreram, nas últimas décadas, grandes incidentes envolvendo barragens de rejeito que implicaram em incalculáveis prejuízos econômicos, sociais e ambientais, alguns deles permanentes (Tabela 1).

Tabela 1 - Principais acidentes de rupturas de barragens no Brasil

(continua)

Data	Localização	Tipo de rejeito	Volume	Impactos
Mai/1986	Barragem de Fernandinho, Itabirito, Minas Gerais, Brasil	Ferro	100.000 ton	O rejeito se espalhou por 12 km e deixou 7 mortos
Jun/2001	Barragem Rio Verde, Nova Lima, Minas Gerais, Brasil	Ferro	-	O rejeito avançou por mais de 6 km, matando pelo menos 2 funcionários da mina e deixando outros 3 desaparecidos
Mar/2003	Indústria Cataguazes de Papel, Cataguazes, MG	Lixívia	1,4 milhões m ³	O rejeito se espalhou por quase 100 km de rios, deixando mais de 600 mil pessoas sem água
Mar/2006	Barragem Rio Pomba Cataguazes, Miraí, Minas Gerais	Bauxita	400 mil m ³	O rejeito vazou para o Rio Fubá, que deságua no Rio Muriaé, e inutilizou áreas agricultáveis e de pastagens

Tabela 1 - Principais acidentes de rupturas de barragens no Brasil

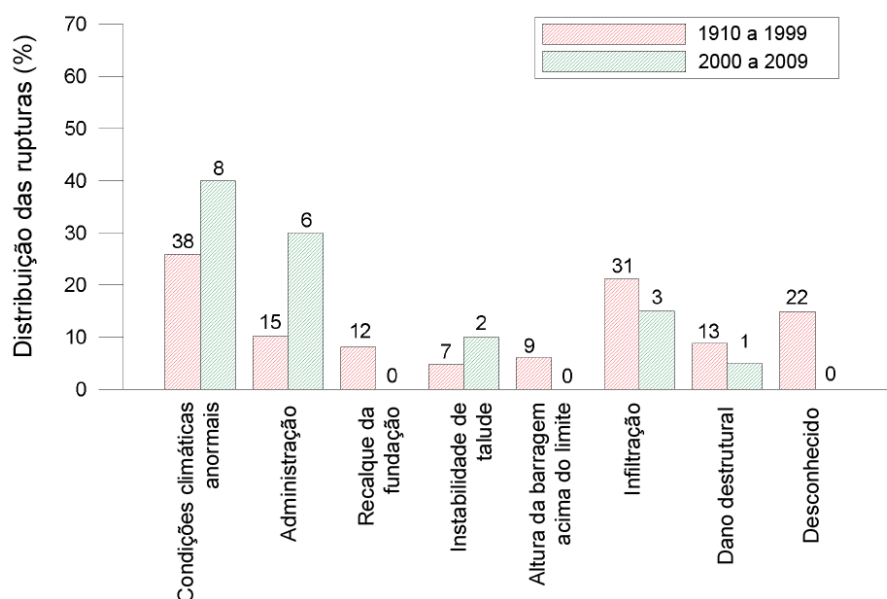
(conclusão)

Jan/2007	Barragem Rio Pomba Cataguazes, Mirai, Minas Gerais	Bauxita	2 milhões m ³	Aproximadamente 4000 desabrigados nas cidades de Mirai e Muriaé, pastos e plantações destruídos, sistema de abastecimento de água comprometido nos estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro
Set/2014	Barragem de Herculano, Itabirito, Minas Gerais	Ferro	-	2 funcionários mortos e 1 desaparecido
Nov/2015	Barragem de Germano, Mariana, Minas Gerais	Ferro	32 milhões m ³	Ao menos 158 casas destruídas, 17 mortos, 2 desaparecidos, poluentes ao longo de 663 km dos rios Gualaxo, Carmel e Doce, potabilidade da água comprometida nos municípios ao longo dos rios

Fonte: WISE, 2017; CETEM, 2012; Duarte, 2008; Ávila, 2016

O trabalho de Azam e Li (2010) aponta, ainda, as causas das rupturas (Figura 1). Percebe-se que, historicamente, a maior parte das rupturas foi ocasionada por condições climáticas anormais, má administração das barragens e infiltrações no maciço. Entretanto, durante a primeira década do século atual não foram observadas ocorrências em ocasião de recalque de fundação ou altura irregular da barragem. Apenas um caso de dano estrutural foi observado.

Figura 1 - Número de ocorrências de ruptura em função das causas (adaptado de Azam e Li, 2010)



Fonte: Adaptado de Azam e Li (2010)

2.1.

Dados sobre a produção de minério de ferro

O minério de ferro lidera a lista da produção mineral nacional. A Tabela 2 apresenta um resumo dos dados de produção no ano de 2016. As reservas mundiais de minério de ferro são da ordem de 170 bilhões de toneladas. O Brasil, com um teor médio de 52,17% de reservas lavráveis, produziu 391 milhões de toneladas no ano de 2016, respondendo por 17,55% da produção mundial. Esse número o coloca no posto de segundo maior produtor, sendo superado apenas pela Austrália. Dentre as federações brasileiras, de acordo com a Tabela 3, Minas Gerais é a de maior destaque, com aproximadamente 74% das reservas e teor médio de 51,69% de ferro (DNPM, 2016; USGS, 2017).

Tabela 2 – Reservas e produção mundial de minério de ferro em 2016

País	Reservas (10 ⁹ t)			Produção (10 ⁶ t)		
	Minério bruto	Contido	Teor (%)	Ferro utilizável	Contido	Representação (%)
Estados Unidos	3,0	0,79	26,33	41	26	1,84
Austrália	52,0	23,00	44,23	825	491	37,03
Brasil	23,0	12,00	52,17	391	254	17,55
Canadá	6,0	2,30	38,33	48	29	2,15
China	21,0	7,20	34,29	353	219	15,84
Índia	8,1	5,20	64,20	160	98	7,18
Irã	2,7	1,50	55,56	26	11	1,17
Casaquistão	2,5	0,90	36,00	21	12	0,94
Rússia	25,0	14,00	56,00	100	60	4,49
África do Sul	1,2	0,77	64,17	60	38	2,69
Suécia	3,5	2,20	62,86	25	15	1,12
Ucrânia	6,5	2,30	35,38	58	35	2,60
Outros países	18,0	9,50	52,78	120	75	5,39
TOTAL	172,5	81,66	47,34	2228	1363	100,00

Fonte: Adaptado de USGS, 2017

Tabela 3 – Reservas e produção brasileira de minério de ferro em 2015

Unidade federativa	Produção bruta (10 ⁶ t)				Produção beneficiada (10 ⁶ t)			
	Quantidade	Contido	Teor (%)	Representação (%)	Quantidade	Contido	Teor (%)	Representação (%)
Minas Gerais	440,56	227,75	51,69	73,97	294,95	187,71	63,64	68,46
Pará	140,92	91,75	65,11	23,66	129,60	83,90	64,74	30,08
Mato Grosso do Sul	8,58	5,25	61,16	1,44	5,87	3,70	63,05	1,36
São Paulo	4,89	0,34	7,00	0,82	0,37	0,25	68,50	0,09
Outros estados	0,66	0,33	50,81	0,11	0,05	0,03	62,59	0,01
TOTAL	595,61	325,42	54,64	100,00	430,84	275,59	63,97	100,00

Fonte: Adaptado de DNPM, 2016

2.2.

Barragens de rejeitos de minério de ferro

Em função das diversas etapas de operações do processamento mineral, são obtidos rejeitos com características mineralógicas e granulométricas diferentes. O beneficiamento do minério bruto gera produtos granulados (*lump* e *hematitinha*) e finos (*sínter feed* e *pellet feed*). A Tabela

4 apresenta relações dos produtos e rejeitos gerados em diferentes etapas do beneficiamento do minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero (Ribeiro, 2015).

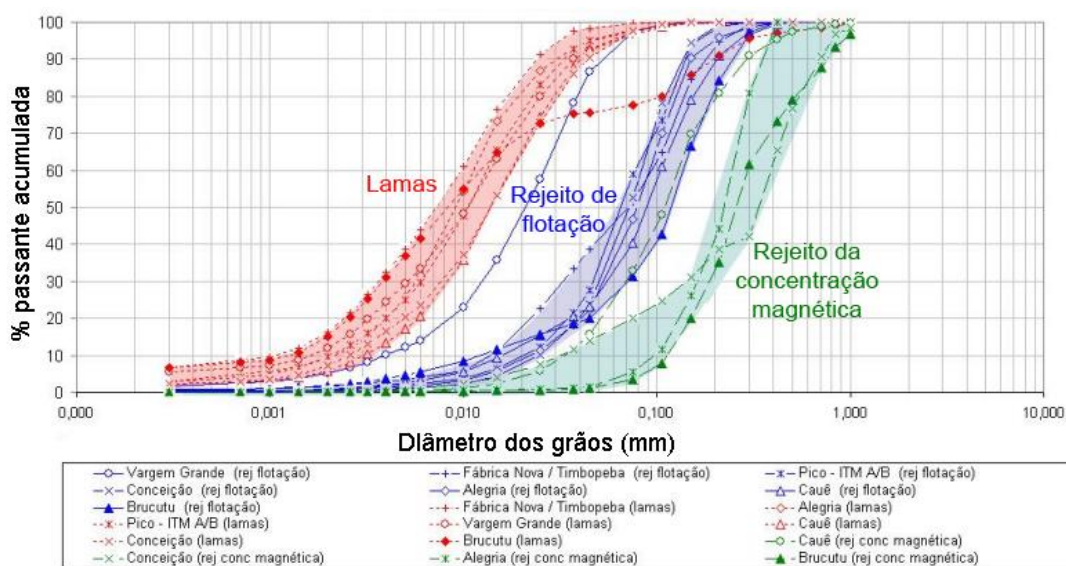
Tabela 4 - Etapas de beneficiamento do minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero

Fração	Método de concentração	Produto	Rejeito	Destinação do rejeito
< (31,5 + 6,3) mm	-	Granulado	-	-
< (6,3 + 1) mm	Jigagem	<i>Sinter feed</i>	Rejeito da jigagem	Pilhas de rejeitos ou moagem e incorporação ao circuito
< (1+0,15) mm	Concentração magnética ou espirais	<i>Sinter feed</i>	Produto não magnético ou rejeito de espirais	Pilhas de rejeitos ou barragens
< 0,15 mm	Concentração magnética e/ou flotação	<i>Pellet feed</i>	Produto não magnético e/ou rejeito de flotação	Barragens
< 0,010 mm	-	<i>Pellet feed</i>	Lamas	Barragens

Fonte: Adaptado de Ribeiro, 2015

Guimarães (2011) fez um levantamento da granulometria de diversas usinas do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Assim, obteve faixas granulométricas dos principais rejeitos dessas usinas (Figura 2).

Figura 2 - Faixas granulométricas dos principais rejeitos das usinas de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero



Fonte: Adaptado de Guimarães, 2011

Os rejeitos podem ser classificados de acordo com a massa ou volume de água presente no total do maciço. Para isso, dois índices físicos são comumente utilizados: concentração volumétrica (C_v) e concentração mássica (C_m) – ver Equações 1 e 2. Ambos são expressos em termos percentuais e indicam, respectivamente, a relação entre o volume de sólidos e o volume total e a relação entre a massa de sólidos e a massa total.

$$C_v = \frac{V_s}{V_t} \times 100\% \quad (1)$$

$$C_m = \frac{M_s}{M_t} \times 100\% \quad (2)$$

Onde V_s é o volume de sólidos, V_t é o volume total, M_s é a massa de sólidos e M_t é a massa total.

Conhecendo-se, ainda, a massa específica real dos grãos do material (ρ_s), é possível correlacionar os dois índices de acordo com a Equação 3.

$$C_v = \frac{C_m M_t}{V_t \rho_s} \quad (3)$$

Watson (2010) apresenta as seguintes classificações de rejeitos quanto a concentração mássica:

- i. Rejeito em polpa: a forma mais convencional, com $30\% < C_m < 55\%$, segregáveis, alta quantidade de água disponível para reaproveitamento;
- ii. Rejeito espessados: os rejeitos são espessados por meio de espessadores de alta densidade ou de fundo cônico, $65\% < C_m < 72\%$, pouca segregação e pequena quantidade de água disponível para reuso;
- iii. Rejeito em pasta: produzido em espessadores específicos de ultra densidade, $70\% < C_m < 85\%$, transportados por bombas de deslocamento positivo;

- iv. Rejeitos filtrados: a água é retirada dos rejeitos utilizando filtros a vácuo ou pressão confinante até que se obtenha $C_m > 85\%$, são transportados por caminhões ou transportadores de correia e compactados após a disposição.

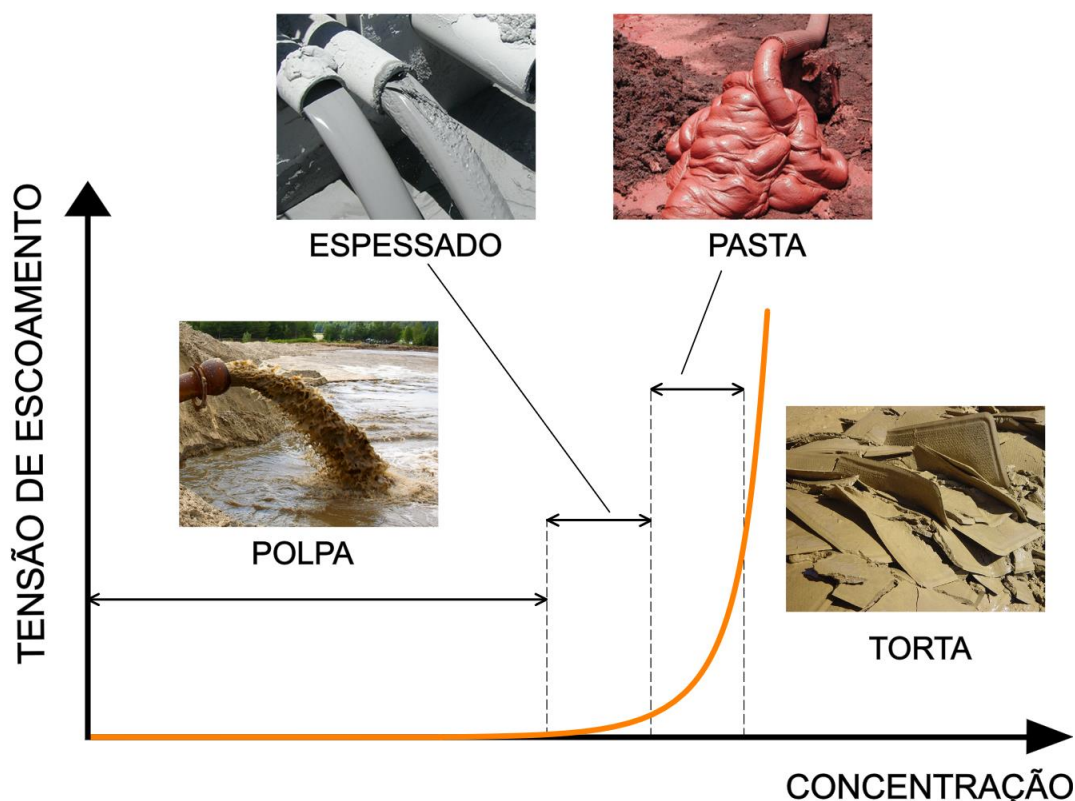
A classificação apresentada por Ribeiro (2015) apresenta certa distinção quanto as concentrações:

- i. Rejeito em polpa: rejeitos com baixa concentração de sólidos ($30\% < C_m < 40\%$), sem espessamento, segregáveis;
- ii. Rejeito espessado: rejeitos com concentrações de sólidos aumentada por meio de processos mecânicos de espessamento ($45\% < C_m < 65\%$), segregáveis e bombeáveis por bombas centrífugas;
- iii. Rejeito em pasta: rejeitos com concentrações de sólidos intermediária ($65\% < C_m < 70\%$), não segregável, bombeável com bombas de deslocamento positivo;
- iv. Rejeito em torta: rejeitos com altas concentrações de sólidos ($80\% < C_m < 85\%$), transportável apenas por meio de esteiras ou caminhões.

Boger (2013) apresenta a curva característica da variação de tensão limite de escoamento em função das concentrações. De acordo com o autor, rejeitos em polpa, pela baixa concentração de sólidos, comportam-se como fluidos newtonianos. Com o espessamento, a concentração dos sólidos aumenta e os rejeitos passam a se comportar como fluidos não-newtonianos e apresentam tensão limite de escoamento. Essa tensão aumenta exponencialmente com a concentração e é acentuada a partir da concentração de pasta (Figura 3).

Dentre as técnicas de disposição de rejeitos, há as barragens, técnica mais utilizada; os empilhamentos drenados, que consistem na disposição em forma de pilha com utilização de materiais mais granulares; as pilhas cônicas, técnica que pode ser aplicada para rejeitos lançados na concentração de pasta e que permite a formação de praias com ângulos de até 10° ou mais de inclinação; e, por fim, os *dry stacks*, ou empilhamento a seco, em que os rejeitos são transportados e despejados por intermédio de caminhões ou transportadores de correia e espalhados por tratores (Ribeiro, 2015; Machado *et al.*, 2017).

Figura 3 – Tensão de escoamento em função da concentração para rejeitos de mineração

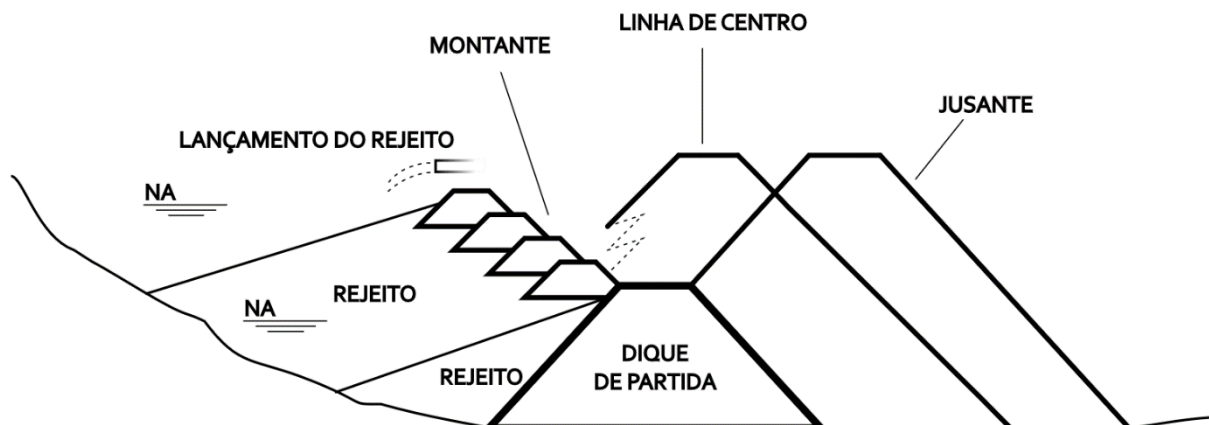


Fonte: Adaptado de Boger, 2013

Usualmente, conforme mostra a Figura 4, as barragens de rejeitos são construídas a partir de um dique de partida em solo compactado. Conforme o volume de rejeito contido se aproxima da capacidade máxima da barragem, são executados alteamentos, e estes podem ser feitos pelos métodos de montante, de jusante e linha de centro. O método de jusante é executado a partir do dique de partida de maneira que o eixo da crista se cresce a jusante conforme a construção dos novos diques. O material utilizado – solo ou a fração mais granular do próprio rejeito – é lançado e compactado até a altura definida para aquele alteamento, permitindo que sejam instalados sistemas de drenagem a cada etapa (Passos, 2009; Rafael, 2012). Apesar de resultar em um maciço com maior segurança, conforme ressalta Ribeiro (2015), o método de jusante é pouco utilizado em face dos altos custos com operação e volume de aterro compactado.

O método de montante é empregado com maior frequência. Na construção é feito um dique de partida em solo argiloso ou enrocamento e, conforme o rejeito depositado se adensa, é formada uma praia de rejeitos que serve como fundação para os diques seguintes (Rafael, 2012). Uma síntese comparativa entre vantagens e desvantagens dos métodos de montante e jusante é apresentada na Tabela 5.

Figura 4 - Alçamento de barragens de rejeito pelos métodos de montante, jusante e linha de centro



Fonte: Autor

Tabela 5 - Comparativo de vantagens e desvantagens entre os métodos de jusante e montante

Método de alçamento	Vantagens	Desvantagens
Montante	• Volume de material de alteamentos menor • Menor custo de construção • Maior velocidade de alteamento • Facilidade de operação • Pode ser executado em topografias muito íngremes, onde o limitante principal é a área de deposição	• Segurança condicionada pela garantia de afastamento do lago a montante para manutenção da linha freática ao talude de jusante • Susceptibilidade a liquefação, dependendo da natureza do rejeito • A superfície crítica pode passar pelos rejeitos • Maior Susceptibilidade a ocorrência de <i>piping</i> em relação aos outros métodos
Jusante	• A barragem fica sobre fundação que não é rejeito fofo • O sistema de drenagem facilita o controle do nível freático • Baixa susceptibilidade a liquefação • Facilidade de operação • Menor probabilidade de ocorrências de <i>piping</i> e de rupturas horizontais • O estéril proveniente da lavra pode ser utilizado ou misturado nos alteamentos • Não há limitações quanto a altura máxima da barragem • A superfície crítica de ruptura, a priori, passa pela estrutura do barramento	• Grande volume de material necessário para execução • Altos investimentos iniciais nos diques de partida e sistemas de drenagem • Dificuldade de aplicação em regiões de muita chuva, pois interfere na compactação adequada

Fonte: Adaptado de Lozano (2006) e Russo (2007)

Já o método de linha de centro é uma combinação dos métodos de jusante e montante. O alteamento não altera o eixo da crista da barragem, de forma que, a montante os diques se apoiam sobre a praia de rejeitos e, a jusante, sobre a fundação.

2.3.

O caso da ruptura da barragem de rejeitos de Fundão

Rémy (2017) destaca que, mesmo após mais de um ano decorrido da ruptura da barragem de Fundão – no subdistrito de Santa Rita Durão, Mariana, Minas Gerais – poucas informações a respeito do caso foram tornadas públicas à comunidade técnica e à sociedade em geral. A principal fonte é um relatório elaborado por Morgenstern *et al.* (2016), que analisaram o caso e apontaram causas imediatas da ruptura. Os autores avaliaram as hipóteses que resultaram na casualidade baseando-se nos relatos de testemunhas oculares, dados e imagens SIG (Sistema de Informação Geográfica), evidências por exploração do subsolo, ensaios de laboratório e modelagem computacional. Machado (2017) também apresenta um relato sobre os fatores de projeto e ocorrências não previstas durante a construção

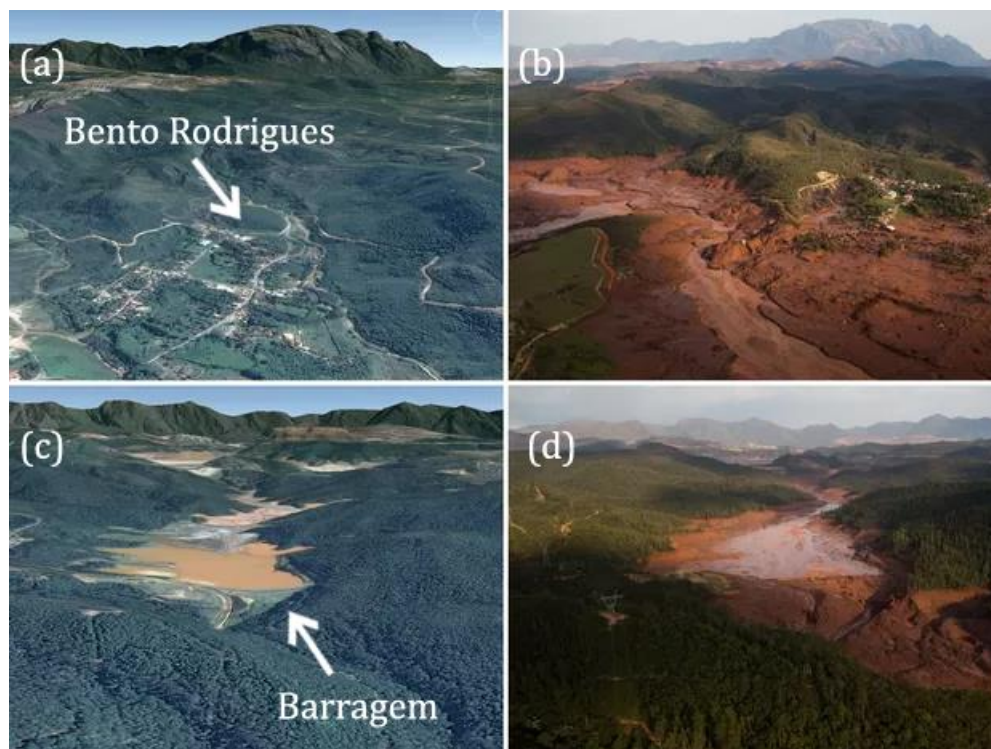
Conforme os depósitos da barragem de Germano – em operação desde 1977 – se aproximavam do limite de capacidade e as atividades em uma nova planta de pelotização iriam aumentar a produção de rejeitos arenosos e lama, tornou-se vital encontrar um novo local para disposição de rejeitos. Isso posto, o vale de Fundão foi o local escolhido. No projeto, os dois tipos de rejeitos resultantes da produção ficariam fisicamente separados.

Desde poucos meses após o início da operação da barragem, em 2009, foi verificada uma série de ocorrências que prejudicavam o seu funcionamento projetado. Destacam-se: *piping*, lançamento de rejeitos em desacordo com o previsto em projeto, recalque de fundação, problemas estruturais e infiltrações no dique de partida.

Na tarde do dia 05 de novembro 2015, instrumentos registraram uma sequência de eventos sísmicos. Dois deles, a aproximadamente de 2,5 km de Fundão, ocorreram em um intervalo de 5 minutos, 3 horas antes da ruptura da barragem. Pouco mais de 1 hora depois, outros três abalos de pequena magnitude em curto intervalo de tempo foram registrados. Em algumas horas a barragem de Fundão se rompeu. O material desprendido atingiu o curso d'água (Figura 5) e

deixou marcas de destruição ao longo de centenas de quilômetros. Calcula-se que 32 milhões de m³ de rejeito foram perdidos, o equivalente a cerca de 61% do volume contido.

Figura 5 – Antes e depois da ruptura em (a) (b) Distrito de Bento Rodrigues; (c) (d) Barragem de Santarém



Fonte: Adaptado de G1, 2015

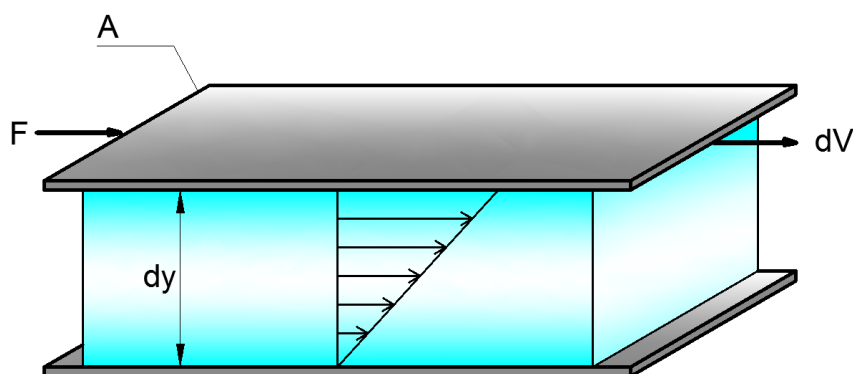
CAPÍTULO 3

Reologia

A inserção do termo “reologia” ocorreu por meio do Professor Bingham, da Universidade de Lafayette, Indiana, Estados Unidos. O significado do termo é “o estudo da deformação e do fluxo da matéria” e passou a ser aceito em 1929, quando foi fundada a Sociedade Americana de Reologia. No primeiro encontro foram discutidos trabalhos que tratavam de propriedades e comportamento de diferentes materiais, como asfalto, lubrificantes, tintas, plásticos e borracha (Barnes *et al.*, 1989).

Todavia, os primeiros trabalhos de maior relevância a respeito de deformação e escoamento dos materiais datam do século XVII, publicados por Hooke e Newton, respectivamente. Hooke, em 1678, publicou sua obra intitulada *True Theory of Elasticity*, propondo que a deformação de qualquer mola é proporcional à tensão aplicada. Poucos anos depois, em 1687, Newton publicou sua obra *Principia* e lançou sua hipótese a respeito do escoamento simples de uma fina camada de fluido entre placas paralelas (Figura 6): a resistência ao cisalhamento que surge ao se aplicar uma força F é proporcional à velocidade com que as partículas do fluido se separam umas das outras (Barnes *et al.*, 1989; Chhabra & Richardson, 2008).

Figura 6 – Representação esquemática de fluxo unidirecional entre placas paralelas



Fonte: Autor

Essa resistência ao escoamento é o que se conhece por ‘viscosidade’. A força por unidade de área necessária para produzir o movimento, F/A , é proporcional ao gradiente de velocidade dV/dy , também chamado ‘taxa de cisalhamento’. A constante de proporcionalidade da equação, μ , é denominada ‘coeficiente de viscosidade’. No caso em questão, por se tratar de uma camada muito fina de fluido, podemos escrever de acordo com a Equação 4:

$$\frac{F}{A} = \tau = \mu \frac{dv}{dy} = \mu \dot{\gamma} \quad (4)$$

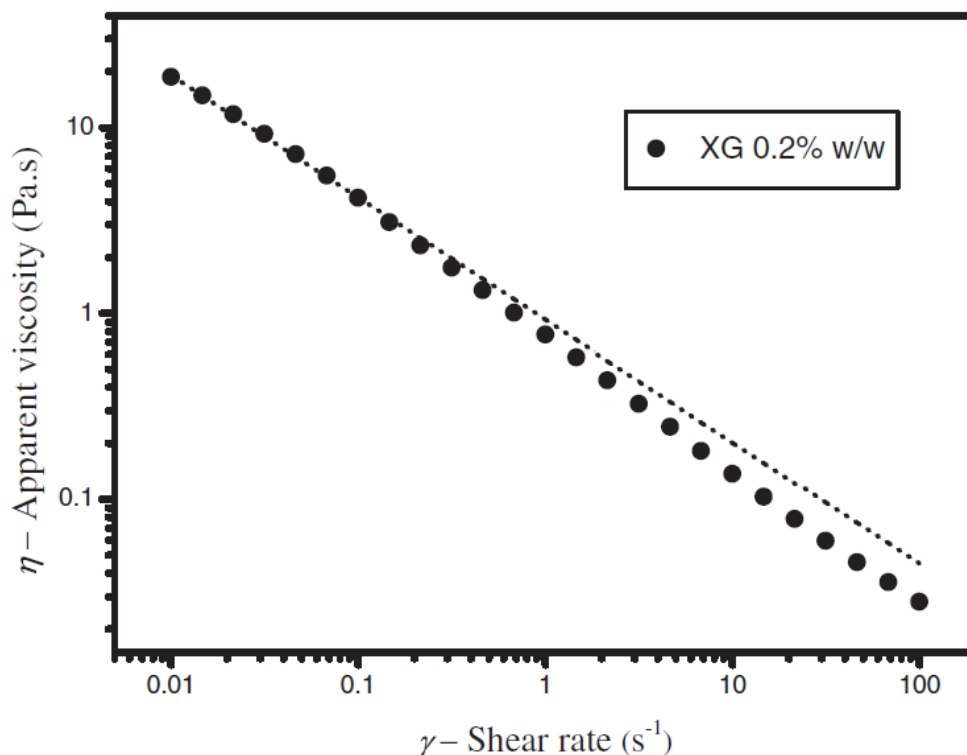
A água, os gases e boa parte dos óleos lubrificantes têm seus comportamentos reológicos bem descritos pela lei de viscosidade de Newton (Fernandes, 2016).

3.1. Fluidos não newtonianos

3.1.1. Comportamentos afinante e dilatante

De acordo com Strivens (1999), o comportamento afinante ou pseudoplástico (*shear thinning*) são caracterizados pelo decréscimo de viscosidade aparente do fluido com o aumento da taxa de deformação (ou tensão de cisalhamento) e a viscosidade aparente a uma dada taxa de deformação não depende do histórico de cisalhamento da amostra. Assim, um fluido com comportamento afinante apresenta elevados valores de viscosidade a baixas taxas de deformação e pequenos valores de viscosidade quando submetido a altas taxas de deformação. Mezger (2006) cita como exemplos de materiais que apresentam comportamento afinante: shampoos, colas, soluções poliméricas e alguns tipos de tintas. Na Figura 7 observa-se uma curva típica de um fluido afinante.

Figura 7 - Viscosidade em função da taxa de deformação para solução de 0,2% de goma xantana



Fonte: Moreira *et al.* (2017)

Ainda de acordo com Strivens (1999), o comportamento dilatante (*shear thickening*) se caracteriza pelo acréscimo de viscosidade conforme a taxa de deformação é incrementada e a viscosidade aparente a uma dada taxa de deformação não depende do histórico de cisalhamento da amostra. Segundo Mezger (2006), dispersões com alta concentração de sólidos ou partículas gelificadas, como suspensões cerâmicas, dispersões de amido e pastas de são exemplos de fluidos que se comportam dessa maneira.

3.1.2.

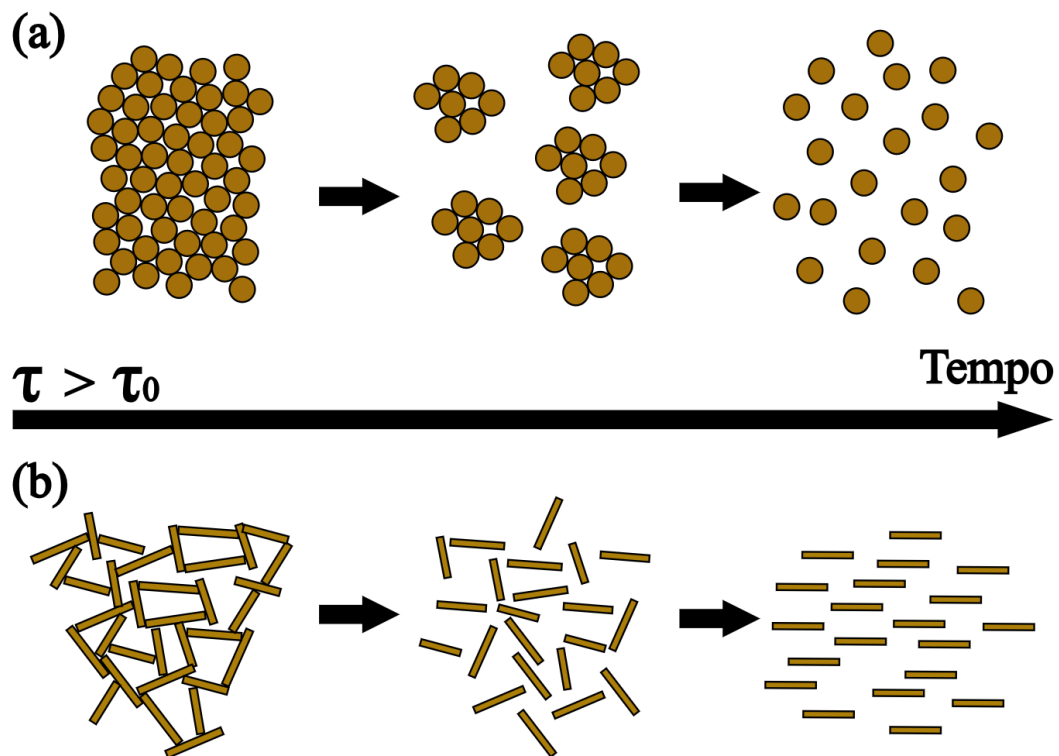
Comportamentos tixotrópico e reopético

Comportamentos tixotrópicos e reopéticos são caracterizados, respectivamente, pelo decréscimo e incremento da viscosidade aparente em função da taxa ou tensão de cisalhamento e do tempo de cisalhamento (Boger, 2013). As definições iniciais de tixotropia (Pryce-Jones, 1934 apud Barnes, 1997) não apontavam essa relação com o tempo e descreviam o fenômeno como “o incremento de viscosidade em um estado de descanso e a redução da viscosidade quando submetido à uma tensão de cisalhamento”, gerando certo conflito com a definição de

fluido afinante. Não obstante, conforme ressaltam Tarcha *et al.* (2015), verifica-se a queda gradual de viscosidade aparente de um material tixotrópico ao se aplicar uma taxa de deformação fixa durante certo intervalo de tempo. Em um fluido afinante a viscosidade aparente só decresce com o aumento da taxa de deformação. Barnes (1997) complementa dizendo que, após suspender a aplicação da taxa/tensão em um material tixotrópico, verifica-se a recuperação da viscosidade. Assim, o tempo é uma variável importante na medição da TLE de fluidos tixotrópicos, uma vez que o fluido pode não escoar imediatamente após a aplicação de uma tensão, mas sim quando ela for mantida por um período maior de tempo.

Segundo Barnes (1997), os fenômenos tixotrópicos existem em fluidos com microestruturas, refletindo a mudança do estado da microestrutura ao longo do tempo. A máxima microestrutura é observada quando o alinhamento e distribuição das partículas é aleatório, enquanto o mínimo, quando as partículas estão alinhadas durante o fluxo. A mudança da microestrutura é resultado da competição entre forças de quebra pelas tensões impostas e forças de reconstrução em decorrência de colisões internas e movimento browniano (Figura 8).

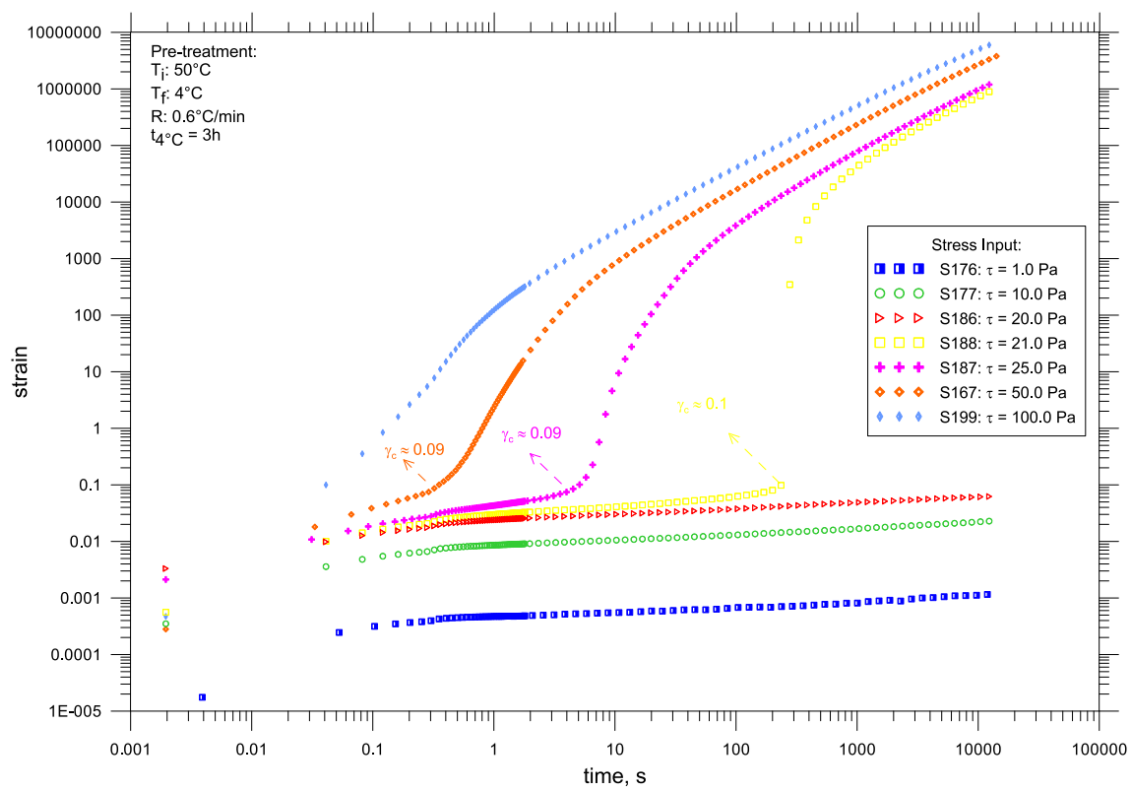
Figura 8 – Modificação gradual da estrutura com o tempo após aplicação de $\tau > \tau_0$ ocasionada por (a) desintegração e (b) reorientação das partículas



Fonte: Autor

As curvas dos resultados em ensaios com petróleo parafínico apresentadas por Tarcha *et al.* (2015) ilustram esse conceito (Figura 9). Para tensões de até 20 Pa, não foi observado escoamento do material. Uma análise equivocada poderia indicar que a TLE foi de 25 Pa, visto que com 10 s ocorreu a quebra da estrutura. Entretanto, ao submeter o material a uma tensão de 21 Pa foi constatado que, após um intervalo maior de tempo (200 s), também houve a quebra da estrutura, evidenciando a importância do tempo como variável.

Figura 9 - Deformação em função do tempo para diferentes tensões de cisalhamento aplicadas em amostras de petróleo parafínico



Fonte: Tarcha *et al.* (2015)

3.2. Modelos viscoplásticos

No início dos estudos com materiais viscoplásticos, havia uma imprecisão quanto a sua caracterização, sendo classificado apenas entre um sólido plástico e um fluido viscoso (Vargas, 2017). De acordo com Fernandes (2016) materiais viscoplásticos somente se deformam de

forma completamente irreversível quando uma tensão mínima é superada, denominada tensão limite de escoamento.

Suspensões de partículas sólidas em meio aquoso, soluções de determinados polímeros, argilas, cremes cosméticos e gel de cabelo são exemplos de materiais viscoplásticos (Barnes, 1999; Souza Mendes e Dutra, 2004; Ancy *et al.*, 2007).

Bingham (1922) propôs o modelo mais tradicional e simples para representar o comportamento de um fluido viscoplástico (Equação 5).

$$\begin{cases} \tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma}, & \text{se } \tau \geq \tau_0 \\ \dot{\gamma} = 0, & \text{se } \tau < \tau_0 \end{cases} \quad (5)$$

Onde τ_0 é a tensão limite de escoamento e μ é a viscosidade aparente. Um fluido de Bingham apresenta comportamento similar ao de um corpo rígido para tensões aplicadas abaixo de τ_0 . Nessa região, a viscosidade tende ao infinito. Quando a TLE é atingida, escoar como um fluido newtoniano.

Herschel e Bulkley (1926) apresentaram um modelo generalizado do modelo de Bingham, também incorporando o modelo *power law* (Equação 6). Assim, foram contempladas as curvas de fluxo não lineares para tensões acima de τ_0 .

$$\begin{cases} \tau = \tau_0 + K(\dot{\gamma})^n, & \text{se } \tau \geq \tau_0 \\ \dot{\gamma} = 0, & \text{se } \tau < \tau_0 \end{cases} \quad (6)$$

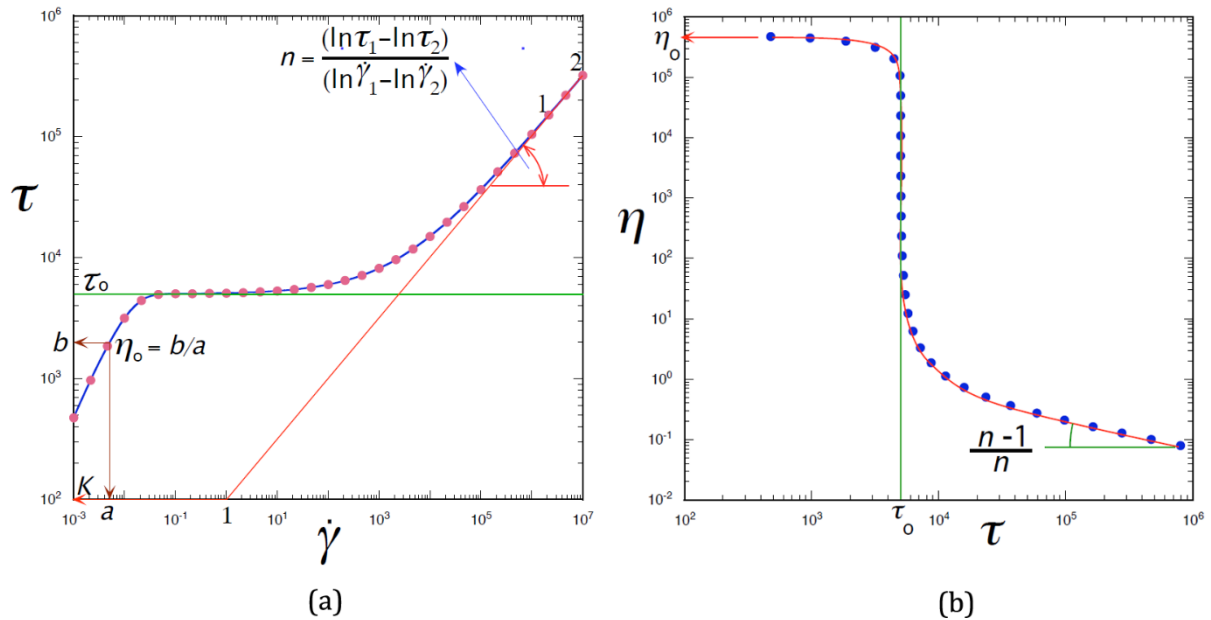
O índice *power law* (n) indica o comportamento do fluxo após a desestruturação do fluido. Se $n = 1$, o modelo se equivale ao modelo de Bingham, ou seja, o fluido escoar como newtoniano após atingir τ_0 . O valor de $n < 1$ representa o comportamento afinante e $n > 1$ um fluido dilatante. O parâmetro K é o índice de consistência do fluido. No caso em que $n = 1$ e $\tau_0 = 0$, K é a viscosidade do fluido.

Souza Mendes e Dutra (2004) propuseram uma nova função de material viscoplástico. A função proposta tem a vantagem de ser contínua e apresentar um platô newtoniano em baixas taxas de deformação (Equação 7).

$$\tau = (1 - \exp(-\eta_0 \dot{\gamma} / \tau_0))(\tau_0 + K(\dot{\gamma})^n) \quad (7)$$

A Figura 10 mostra os significados dos parâmetros η_0 , τ_0 , K e n . n é a inclinação da região *power law* no gráfico τ x $\dot{\gamma}$ em escala log-log; K é o índice de consistência do material e pode ser obtido pelo prolongamento da região *power law* até a reta vertical $\dot{\gamma} = 1 \text{ s}^{-1}$; τ_0 é a tensão em que ocorre a queda abrupta de viscosidade; η_0 é a razão $\tau / \dot{\gamma}$ na região de viscosidade em taxas tendendo a zero, de forma que τ é menor que τ_0 para garantir que $\dot{\gamma}$ esteja nessa região.

Figura 10 – Modelo SMD: (a) Tensão de cisalhamento em função de acordo com a ; (b) Viscosidade em função da tensão de cisalhamento



Fonte: Souza Mendes e Dutra (2004)

3.3.

Modelos mecânicos para materiais viscoelásticos

Os efeitos elástico e viscoso dos materiais podem ser representados pelos elementos mola e amortecedor, respectivamente, que obedecem a Lei de Hooke (Equação 8) e Lei de Newton (Equação 9).

$$\tau = G\gamma \quad (8)$$

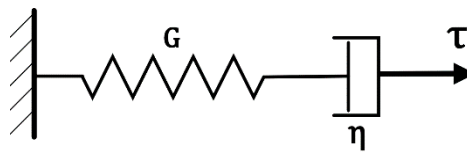
$$\tau = \mu\dot{\gamma} \quad (9)$$

Onde G é o módulo elástico e γ é a deformação.

Materiais viscoelásticos podem ser representados por analogias de modelos mecânicos formados por associações de dois ou mais desses elementos.

O modelo de Maxwell é constituído por uma mola associada em série a um amortecedor (Figura 11) e representa um fluido viscoelástico. Nesse modelo, a tensão em cada elemento é igual a tensão aplicada ao sistema (Equação 10), enquanto a deformação total é igual à deformação em cada um (Equação 11). Manipulando as equações, chega-se na expressão para a tensão total no sistema (Equação 12).

Figura 11 - Representação esquemática do modelo mecânico de Maxwell



Fonte: Autor

$$\tau = \tau_e = \tau_v \quad (10)$$

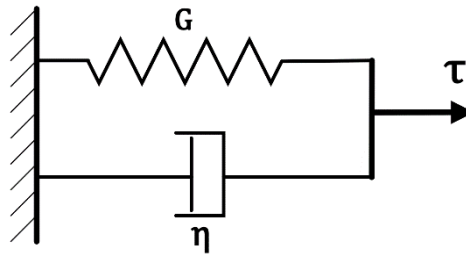
$$\gamma = \gamma_e + \gamma_v \quad (11)$$

$$\tau + \frac{\eta}{G} \dot{\tau} = \eta \dot{\gamma} \quad (12)$$

Onde τ_e e γ_e representam a tensão e deformação na mola e τ_v e γ_v representam a tensão e deformação no amortecedor.

O modelo de Kelvin-Voigt, que representa um sólido viscoelástico, é formado por uma mola e um amortecedor em paralelo (Figura 12). Os dois elementos são conectados por uma placa rígida, de forma que a deformação de cada elemento é igual a deformação total do sistema (Equação 13). A tensão total é igual a soma das tensões de cada elemento (Equação 14), resultando na Equação 15.

Figura 12 - Representação esquemática do modelo mecânico de Kelvin-Voigt



Fonte: Autor

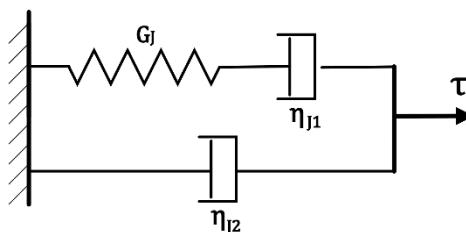
$$\gamma = \gamma_e = \gamma_v \quad (13)$$

$$\tau = \tau_e + \tau_v \quad (14)$$

$$\tau = G\gamma + \eta\dot{\gamma} \quad (15)$$

O modelo de Jeffreys (Figura 13) é formado pela associação de um elemento de Maxwell em paralelo com um amortecedor. Assim, é capaz de representar qualitativamente todos os tipos de comportamentos mecânicos, desde um sólido elástico ideal até um fluido puramente viscoso.

Figura 13 - Representação esquemática do modelo mecânico de Jeffreys



Fonte: Autor

Matematicamente, o modelo é escrito conforme as Equações 16 ou 17:

$$\tau + \frac{\eta_{J1}}{G_J} \dot{\tau} = (\eta_{J1} + \eta_{J2}) \dot{\gamma} + \eta_{J1} \frac{\eta_{J2}}{G_J} \ddot{\gamma} \quad (16)$$

$$\tau + \theta_1 \dot{\tau} = \eta(\dot{\gamma} + \theta_2 \ddot{\gamma}) \quad (17)$$

Onde,

$$\eta = \eta_{J1} + \eta_{J2} \quad (18)$$

$$\theta_1 = \left(1 - \frac{\eta_{J2}}{\eta}\right) \frac{\eta}{G_J} \quad (19)$$

$$\theta_2 = \left(1 - \frac{\eta_{J2}}{\eta}\right) \frac{\eta_{J2}}{G_J} \quad (20)$$

Sendo η a viscosidade total do sistema, η_{J1} e η_{J2} as viscosidades dos amortecedores, G_J é o módulo elástico da mola, θ_1 é o tempo de relaxação e θ_2 é o tempo de retardo.

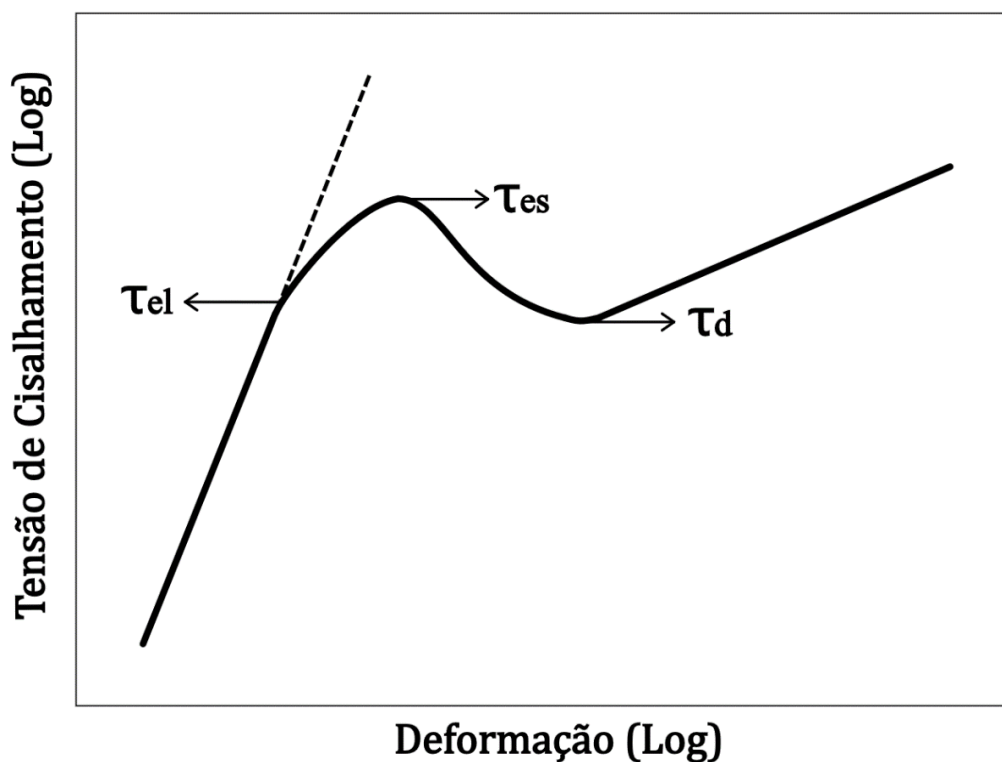
3.4.

Comportamento de materiais viscoelastoplásticos

Kraynik (1990 apud Bonnetaze e Brady, 1992) apresentou uma curva característica de materiais viscoelastoplásticos, conforme visualizado na Figura 14. O autor apresentou os conceitos de três tensões limites diferentes. A primeira, tensão limite elástica, representa o limite de reversibilidade do material (não, necessariamente, pelo limite linear da curva). A aplicação de tensões acima da tensão limite elástica irão acarretar em deformações irreversíveis para o material. A segunda é a tensão limite estática, que é o valor mínimo necessário para quebrar a estrutura e ocasionar o escoamento contínuo, sendo o valor de maior interesse para

fins de engenharia e equivalente ao conceito de tensão limite de escoamento de Bingham. Por último, a tensão dinâmica representa a tensão mínima necessária para a manutenção do escoamento após desestruturação do material.

Figura 14 - Curva característica de materiais viscoelastoplásticos



Fonte: Adaptado de Tarcha (2014)

3.5. Reologia aplicada a rejeitos de mineração

Como relatado no Capítulo 1, conhecer a fundo o comportamento reológico dos rejeitos é fundamental para questões de projeto de uma barragem, tanto para dimensionamento de dutos e sistemas de bombeamento quanto para análise da propagação da onda de ruptura. A literatura apresenta trabalhos já realizados com tal finalidade.

Sofrá e Boger (2002) caracterizaram reologicamente um rejeito de bauxita (lama vermelha) utilizando *vane* e capilares, constatando que se trata de um material tixotrópico. Ademais, verificou-se que a TLE aumenta exponencialmente com a concentração. Os autores enfatizam

que determinar o ponto de inflexão, que representa a concentração a partir da qual a TLE aumenta de forma significativamente rápida, tem extrema importância para otimizar os projetos de sistemas de bombeamento do rejeito.

Jeong (2015) estudou as características geotécnicas e reológicas de um depósito de rejeitos de rocha de uma mina abandonada na cidade de Busan, Coréia do Sul. As amostras foram preparadas com material de granulometria menor que 4,75 mm, compostas de pedregulhos, areias e pequena fração argilosa. As medições foram feitas com um reômetro de bola rodante e comparadas ao valor da resistência não drenada obtidas com o cone sueco. O autor verificou que o material apresentava um comportamento afinante e concordância satisfatória entre os dois métodos empregados.

Adiansyah *et al.* (2016) estudaram a variação da TLE de rejeitos de uma mina de carvão para concentrações de sólidos entre 30% e 70%, tendo como objetivo correlacionar as concentrações com a energia necessária para o sistema de bombeamento utilizado na disposição do rejeito. Os ensaios reológicos, também utilizando o *vane* como geometria, mostraram que o material é bem aproximado pelo modelo de Herschel-Bulkley e que a relação entre concentração de sólidos e TLE é exponencial.

Imteaz (2016) também utilizaram um mini *vane* para determinar a tensão limite de escoamento de rejeitos provenientes de um moinho de urânio de Saskatchewan, Canadá. A pasta de rejeito era colocada em um molde cilíndrico e a palheta imersa até uma profundidade igual a sua altura. Aplicava-se, então, uma rotação de 2 rad/min e, a partir das medições dos valores de torque, as tensões cisalhantes eram calculadas e a tensão máxima (TLE) determinada.

CAPÍTULO 4

Abordagem experimental

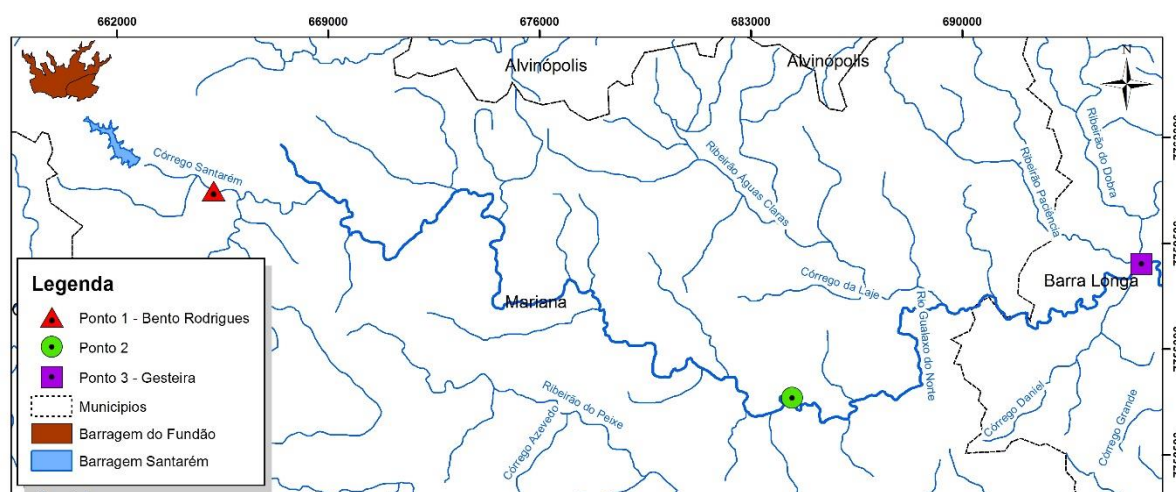
4.1.

Coleta do material

As amostras foram coletadas do material desprendido após a ruptura em Fundão em três pontos a jusante da barragem. O primeiro, mais próximo a barragem, no distrito de Bento Rodrigues, município de Mariana, no córrego Santarém. Os outros dois mais distantes, no rio Gualaxo do Norte, no distrito de Paracatu de Baixo e no município de Barra Longa (Figura 15).

O propósito em coletar amostras de pontos distintos foi verificar a variação dos parâmetros geotécnicos e reológicos com o decorrer do fluxo dos rejeitos desprendidos da barragem.

Figura 15 - Pontos de coleta das amostras de rejeito



Fonte: Machado (2017)

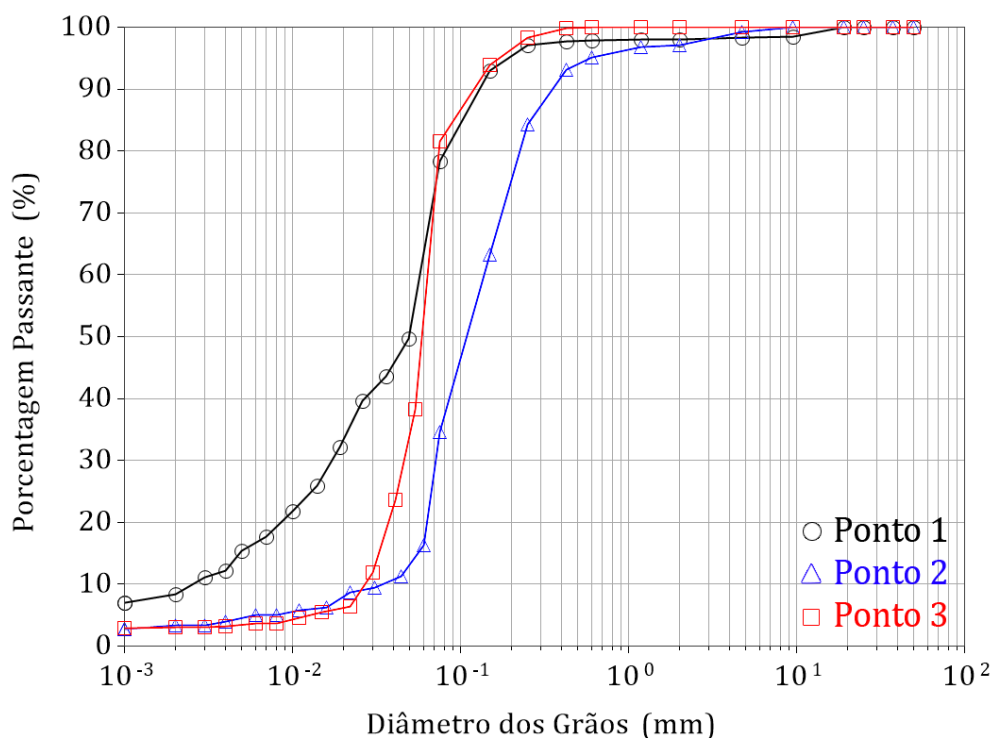
4.2. Caracterização geotécnica e mineralógica

A caracterização geotécnica do material foi realizada conforme procedimentos das seguintes referências normativas:

- i. NBR 7181: Análise granulométrica de solos (ABNT, 1984);
- ii. NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez (ABNT, 1984);
- iii. NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade (ABNT, 1984);
- iv. NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica (ABNT, 1984).

As curvas de distribuição granulométrica são apresentadas na Figura 16 e, na Tabela 6, a compilação dos resultados dos ensaios de caracterização geotécnica. A presença considerável de material com fração arenosa não permitiu a obtenção dos limites de consistência. As amostras foram classificadas segundo os sistemas HRB (*Highway Research Board*) e SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos) apresentados por Das (2011), constatando que se tratam de siltes arenosos (P1 e P3) e uma areia mal graduada (P2) – ver Tabela 7.

Figura 16 - Curvas granulométricas das amostras



Fonte: Autor

Tabela 6 - Resumo da caracterização geotécnica das amostras

Ponto	Tamanho de partículas				LP (%)	LL (%)	ρ_s (g/cm ³)
	Argila	Silte	Areia	Pedregulho			
P1	8,42	53,48	35,18	2,92	NP	NL	3,37
P2	2,97	12,83	82,46	1,74	NP	NL	3,09
P3	3,03	49,27	47,7	0	NP	NL	3,21

Fonte: Autor

Tabela 7 - Classificação dos materiais segundo os sistemas HRB e SUCS

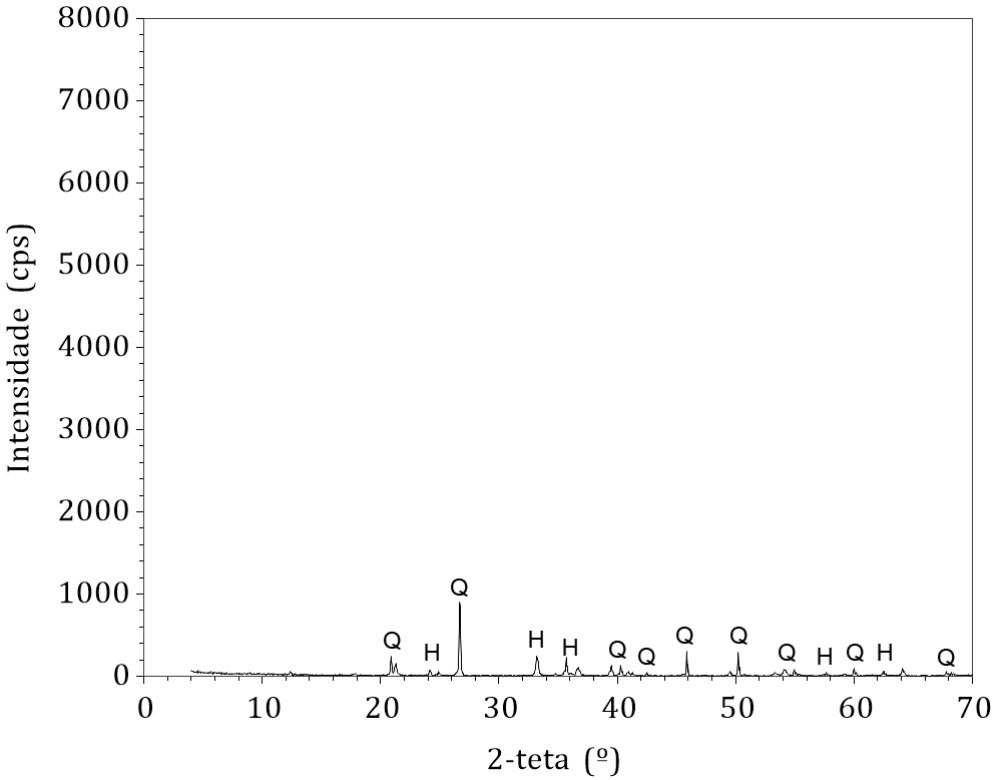
Ponto	Classificação		Nomenclatura
	HRB	SUCS	
P1	A-4 (0)	ML	Silte arenoso
P2	A-2-4 (0)	SP	Areia mal graduada
P3	A-4 (0)	ML	Silte arenoso

Fonte: Autor

Para identificar os minerais presentes nas amostras, foram realizadas análises de difração de raios X no Laboratório de Nanometria Fotônica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo. Os minerais identificados foram quartzo (SiO₂), hematita (Fe₂O₃) e também goetita (FeO(OH)). Embora a literatura contenha diversas análises mineralógicas dos produtos resultantes da mineração, pouco se encontra a respeito da constituição do rejeito. Entretanto, os difratogramas (Figuras Figura 17, Figura 18 e Figura 19) são similares ao encontrado por Costa *et al.* (2014) para rejeitos de *sinter feed*.

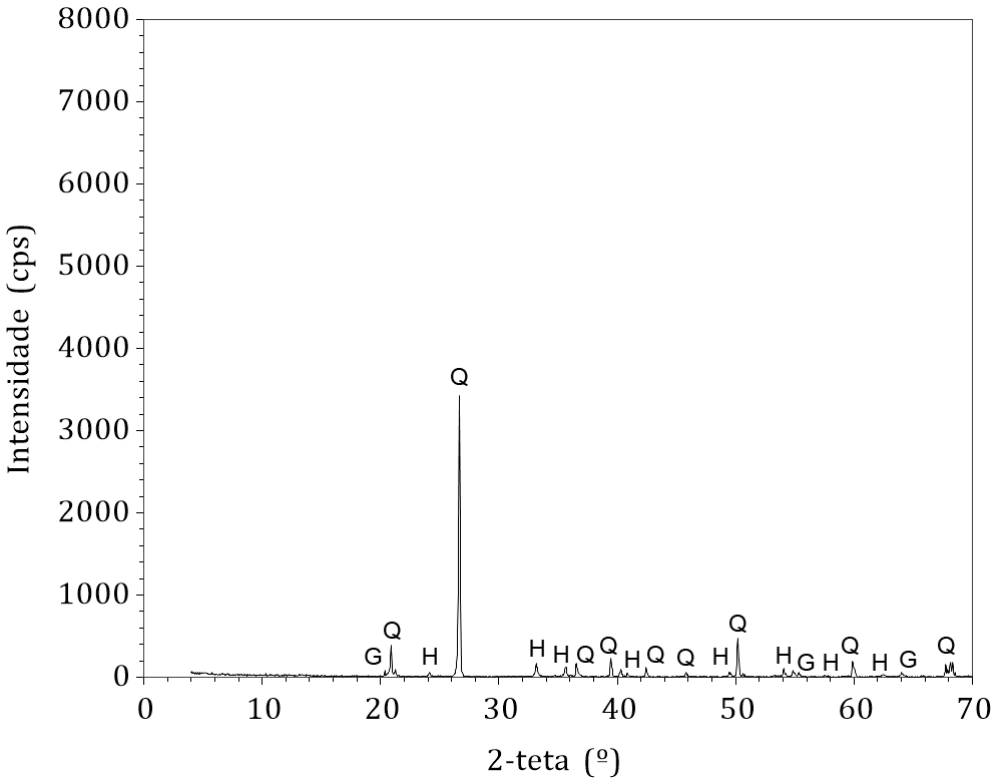
Os resultados também revelam a diferença de composição conforme o material avançou pelo curso d'água. A hematita, principal mineral componente do minério de ferro, foi encontrada em maior quantidade na amostra do Ponto P1. A amostra do Ponto P3, por ser aquela mais distante da barragem, contém pequena concentração de minerais de ferro, sendo composta majoritariamente por quartzo. Na amostra do ponto intermediário, P2, também se verificou a presença de quartzo, em proporções menores que do Ponto P3, hematita, além de goetita, outro mineral constituinte do minério de ferro.

Figura 17 - Difratoograma: Ponto P1. Q: Quartzo, H: Hematita.



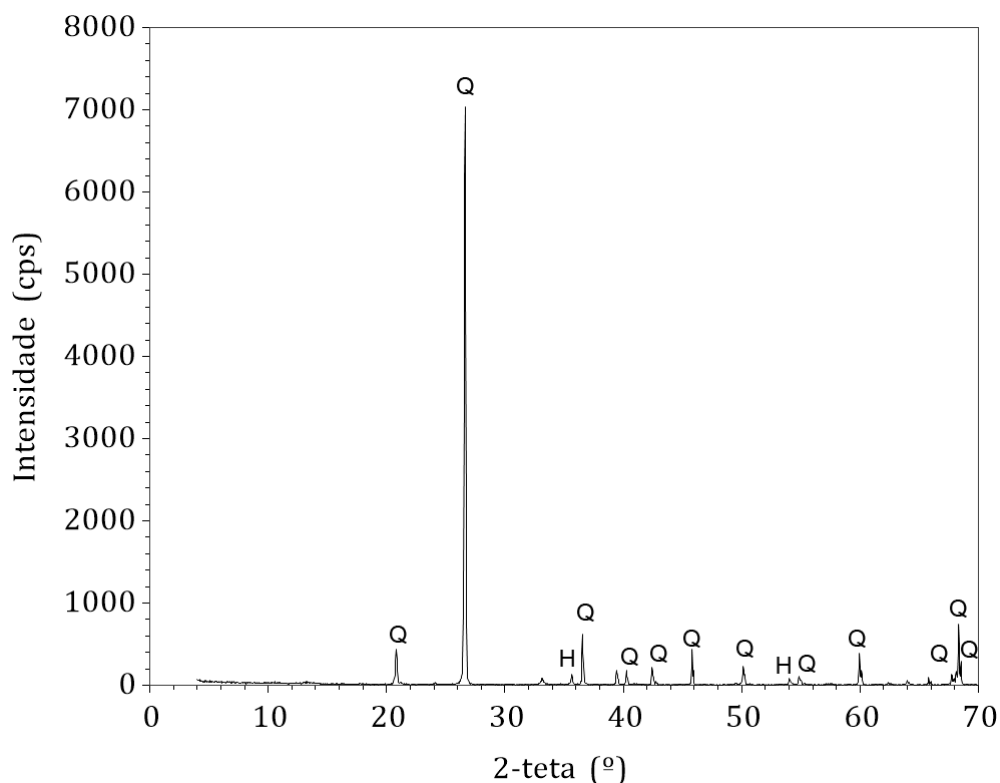
Fonte: Autor

Figura 18 - Difratoograma: Ponto P2. Q: Quartzo, H: Hematita, G: Goetita.



Fonte: Autor

Figura 19 - Difratoograma: Ponto P3. Q: Quartzo, H: Hematita.



Fonte: Autor

4.3. Preparação das amostras

Cada ensaio foi realizado com a preparação de uma nova amostra de acordo com as concentrações volumétricas definidas. O material era seco em estufa a temperatura de 105 °C e separado na peneira de 150 µm. Esse processo tinha por objetivo evitar obstrução no espaço entre a parede do cilindro e o *vane*. O material passante era separado em frações de 100 g que eram lacradas em recipientes hermeticamente fechados para evitar absorção de umidade. No instante da preparação da amostra, o material seco era disposto em uma cuba de silicone juntamente com a quantidade de água destilada equivalente a concentração volumétrica desejada. A homogeneização era feita manualmente com uma espátula metálica durante 5 minutos.

A priori, foram fixados os teores de umidade e, dessa forma, as concentrações mássicas independiam do ponto de coleta a que pertencesse a amostra. Tendo em mãos o valor da massa específica real dos grãos, esse valor foi convertido em concentração volumétrica (Tabela 8). Os

valores foram definidos de modo que se pudessem executar os ensaios no reômetro. Maiores concentrações com a amostra do Ponto P2 resultavam em alto volume de sedimentos depositados no fundo do cilindro e impediam a rotação da palheta.

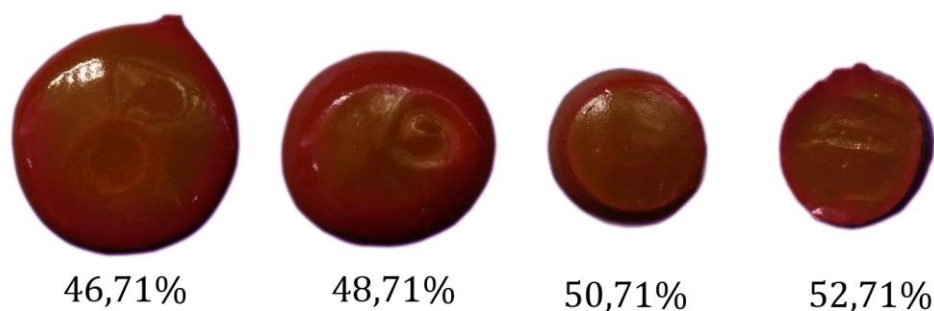
Tabela 8 - Teores de umidade, concentrações mássicas e concentrações volumétricas das amostras ensaiadas.

w (%)	Cm (%)	Cv (%)	
		P1	P2
26,62	78,98	52,71	54,87
28,85	77,61	50,71	52,87
31,25	76,19	48,71	50,87
33,85	74,71	46,71	48,87

Fonte: Autor

Assim, de acordo com a classificação de Watson (2010) apresentada na seção 2.2, as concentrações das amostras ensaiadas são classificadas como pasta. A Figura 20 ilustra o aspecto das amostras de cada concentração volumétrica do Ponto P1.

Figura 20 – Aspecto das amostras do P1 nas quatro concentrações estudadas



Fonte: Autor

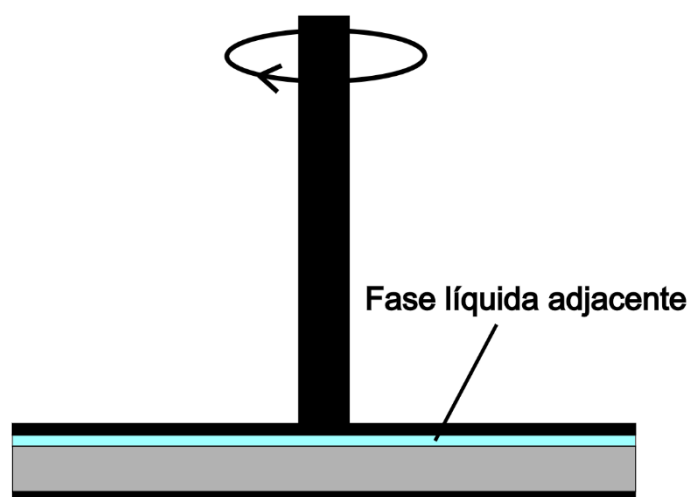
4.4.

Descrição dos ensaios

Os ensaios reológicos foram feitos em um reômetro rotacional de tensão controlada, modelo AR 2000ex, fabricado pela TA Instruments nos Estados Unidos. Esse equipamento permite medir torques de 0,1 μNm a 200 mNm (TA Instruments, 2008). A geometria inferior utilizada

foi um cilindro peltier estacionário e a superior um *vane* (palheta), fabricados em aço inoxidável. Barnes e Nguyen (2001) e Sofrá e Boger (2002) destacam que essa geometria tem a vantagem em relação as demais por eliminar a ocorrência de deslizamento entre a sua superfície e o material. Barnes (1995) explica como ocorre o deslizamento no fluxo de materiais compostos por sólidos dispersos em uma matriz líquida: a fase sólida se afasta da parede e é formada uma camada adjacente à superfície onde da fase líquida está presente, agindo como um fluido lubrificante (Figura 21).

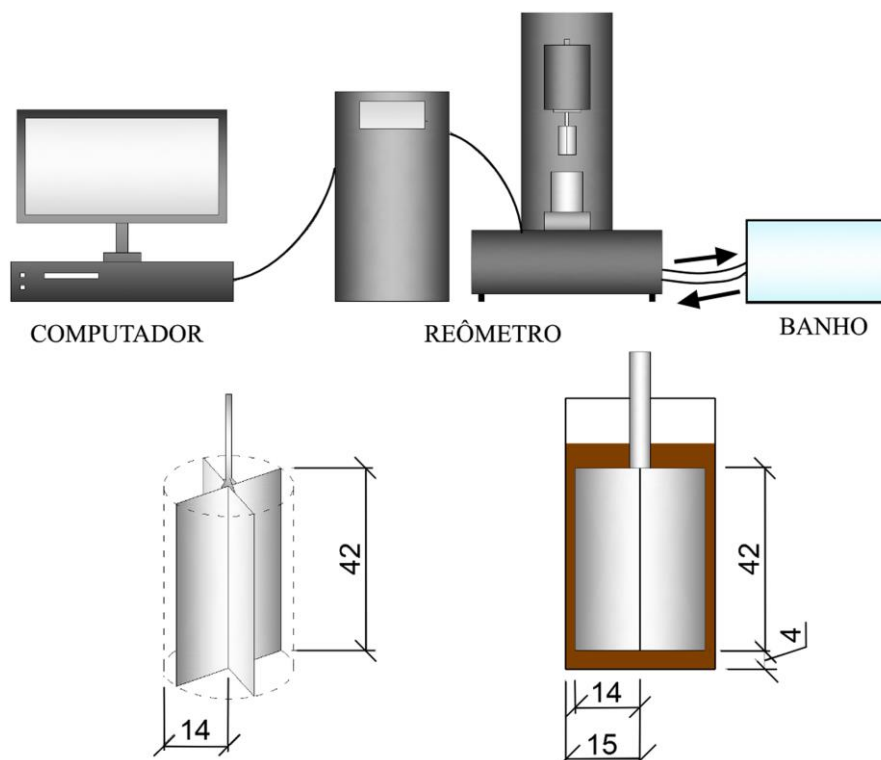
Figura 21 – Deslizamento de dispersões causada por afastamento das partículas sólidas em placas paralelas.



Fonte: Autor

Apesar de o cilindro ser peltier, o controle de temperatura era auxiliado por um banho térmico com circulador de água. Um esquema representativo do sistema e da geometria é apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Desenho esquemático do reômetro e geometria do *vane* (dimensões em milímetros)



Fonte: Autor

A preparação das amostras de rejeito, independentemente do tipo de ensaio a ser realizado, era sempre padronizada. Finalizada a homogeneização, cerca de 33 ml eram dispostos no cilindro e o *vane* era ajustado até um *gap* de 4 mm acima do fundo do cilindro. Nesse instante, parte do material restante na cuba de silicone era colocado em uma cápsula para aferição da umidade. Todos os ensaios foram realizados a temperatura de 25°C. Todos os ensaios tiveram duração de 600 s – exceto os de histerese, que tiveram o dobro de duração, e os oscilatórios, nos quais a duração dependia da frequência aplicada. Esse intervalo de tempo foi escolhido de modo a mitigar o efeito da sedimentação das partículas sólidas das amostras, sobretudo nas de menor concentração. Se uma amostra permanecesse submetida a pequenos valores de taxa ou tensão durante um longo intervalo de tempo, a homogeneização não seria garantida e o sistema se tornaria bifásico, com os sólidos depositados no fundo e uma camada de água excedente na superfície. Tal fato também justifica a opção por utilizar a geometria *vane* e não outra, como a de placas paralelas.

A sedimentação foi um problema crítico relacionado aos ensaios com o material do Ponto P3 (Figura 23). Após dispor a amostra na geometria, as partículas sólidas decantavam em um intervalo de tempo muitíssimo curto, tornando o sistema bifásico mesmo antes de se posicionar a palheta. Em decorrência, ao impor o *gap* de 4 mm, a palheta descia até encontrar os sólidos sedimentados no fundo e o eixo do reômetro necessitava aplicar uma força normal acima do usual para transpor aquela camada. Quando isso ocorria, o reômetro interrompia o ajuste do *gap* antes de chegar ao valor requisitado. Portanto, não foi possível a realização de ensaios com o material desse ponto.

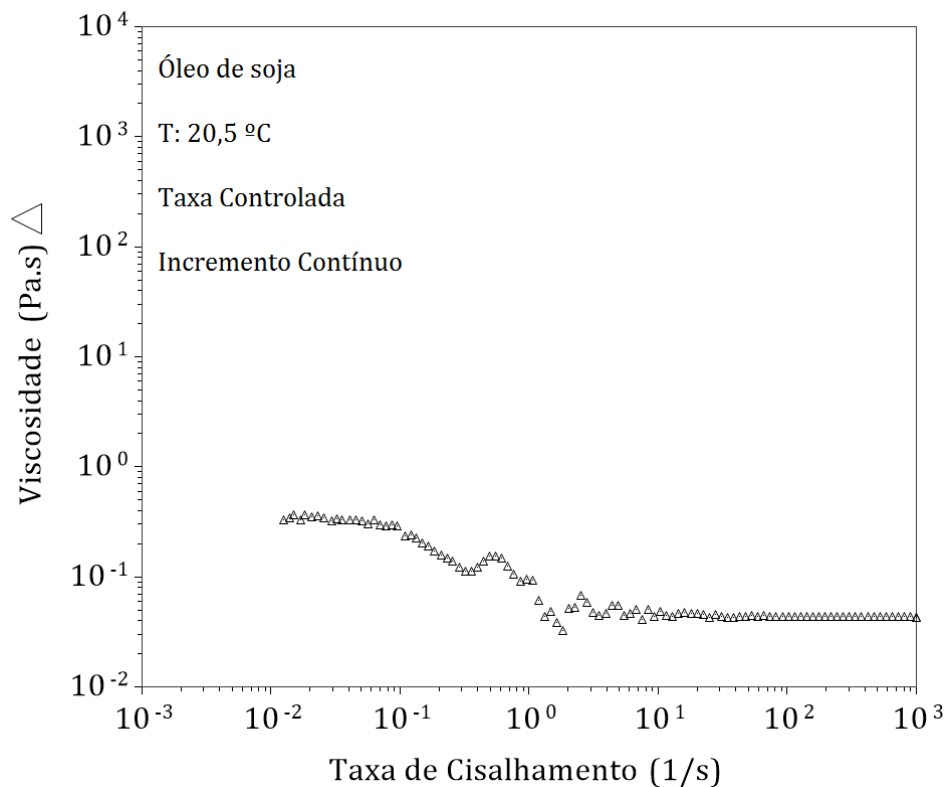
Figura 23 - Camada de água superficial quando amostra de menor concentração é deixada em repouso



Fonte: Autor

Para melhor conhecer o equipamento e a geometria, testes preliminares foram realizados utilizando um óleo de soja – um fluido newtoniano – que já havia sido ensaiado no Laboratório de Reologia da Ufes. Um resultado é apresentado a seguir na Figura 24, a curva de fluxo obtida por incremento de taxas entre 10^{-3} s^{-1} e 1000 s^{-1} . Nota-se que somente valores acima de 10^{-2} s^{-1}

Figura 24 - Curva de fluxo: óleo de soja

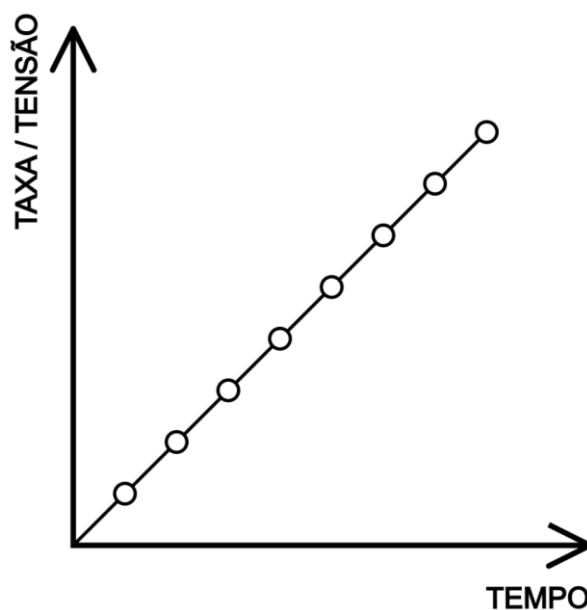


Fonte: Autor

4.4.1. Ensaio de fluxo

O primeiro método aplicado para determinação da TLE foi o de incremento contínuo de taxa e tensão (Figura 25). Era imposto um intervalo de taxa/tensão e observado o comportamento das curvas de fluxo. Por se tratar de um reômetro de tensão controlada, a imposição de taxa pelo AR 2000ex é feita por *feedback* das tensões para que resultem nos valores de taxa desejados. Como o alvo de estudo também é uma tensão, o incremento de tensão até a verificação de alterações bruscas nas propriedades do material é uma opção natural. Por outro lado, pode-se dizer que um aspecto negativo da imposição de tensão é que a medição resulta numa faixa e não em um valor de quebra. Em um estágio o valor imposto não é suficiente para ruptura do material e, no estágio seguinte, uma tensão superior ao limite (Tarcha, 2014).

Figura 25 – Representação do incremento contínuo



Fonte: Autor

4.4.2.**Ensaio de fluência**

O método do ensaio de fluência permite avaliar a dependência com o tempo do material além de verificar o valor da TLE. Foram impostos valores de tensões abaixo, pouco acima e bastante acima das TLEs identificadas nas *flow curves*. Cada nível de tensão era mantido inalterável durante todo o tempo e avaliadas as curvas de deformação, taxa de cisalhamento e viscosidade em função do tempo.

4.4.3.**Ensaio oscilatório**

Outra abordagem experimental para determinar a tensão de escoamento se baseia na realização de ensaios oscilatórios. Esses ensaios permitem analisar, simultaneamente, as propriedades elástica e viscosa do material. Em baixas taxas de deformação, um material viscoelástico se comporta de forma mais próxima a um sólido elástico hookeano (Equação 8); após a quebra da estrutura, predomina o comportamento newtoniano (Equação 9).

Os ensaios oscilatórios consistem em aplicar estímulos oscilatórios de deformação ou tensão na amostra. No caso de deformação, é aplicada uma deformação senoidal controlada de amplitude γ_a (Equação 21).

$$\gamma(t) = \gamma_a \sin \omega t \quad (21)$$

Onde γ_a é a amplitude de deformação, ω é a frequência angular e t é o intervalo de tempo.

Derivando a Equação 21 em relação ao tempo, obtém-se a Equação 22, que expressa $\dot{\gamma}$ em função do tempo:

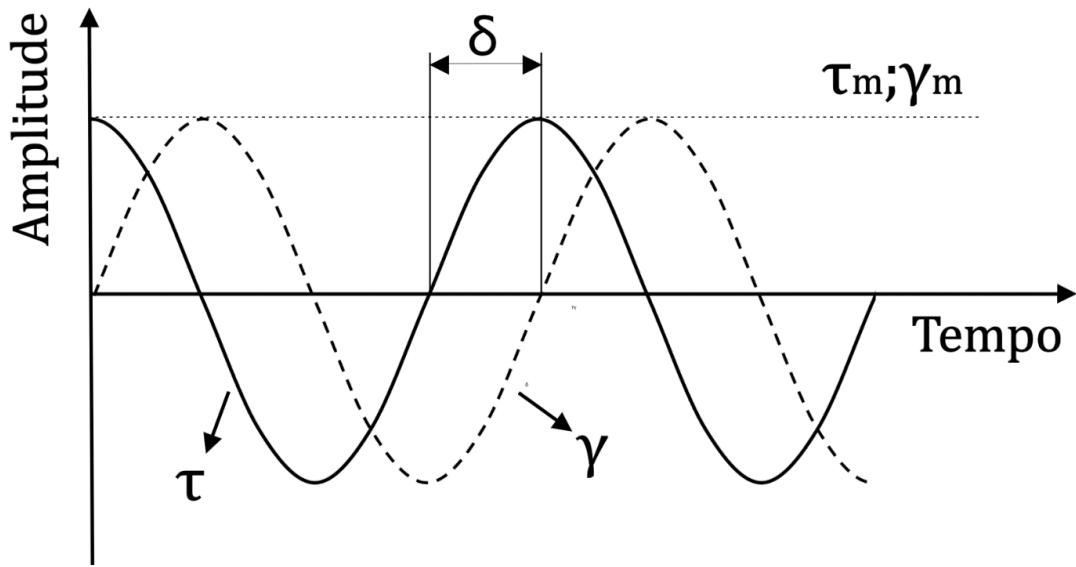
$$\dot{\gamma}(t) = \frac{d\gamma}{dt} = \gamma_a \omega \cos \omega t = \gamma_a \omega \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (22)$$

Substituindo a Equação 22 na Equação 9, obtém-se a resposta da tensão quando submetida a deformações oscilatórias:

$$\tau(t) = \mu \gamma_a \omega \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (23)$$

Das Equações 21 e 23, percebe-se que há uma diferença de fase de $\pi/2$ entre a deformação aplicada e a tensão de cisalhamento resultante (Figura 26).

Figura 26 - Deformação e tensão durante um ensaio oscilatório



Fonte: Autor

O ângulo de fase (δ) se torna um parâmetro para quantificar o nível de visco-elasticidade do material: valores de δ tendendo a zero indicam um comportamento predominantemente elástico e valores maiores destacam a natureza visco-elástica do fluido, até $\pi/2$ que representa o caso puramente viscoso. Assim, pode-se escrever a tensão da forma que mostra a Equação 24.

$$\tau(t) = \mu \gamma_a \omega \sin(\omega t + \delta) \quad (24)$$

A tensão pode, ainda, ser escrita na forma de dois componentes: uma parcela τ_a' , em fase com a tensão ($\delta = 0$), e outra τ_a'' completamente fora de fase ($\delta = \pi/2$). Portanto, a tensão pode ser reescrita conforme a Equação 25 e surgem duas funções de extrema importância para se caracterizar a viscoelasticidade: o módulo de armazenamento ou módulo elástico (G') e o módulo de dissipação ou módulo viscoso (G'') (Equações 26 e 27).

$$\tau(t) = \tau'(t) + \tau''(t) = \tau_a' \sin(\omega t) + \tau_a'' \cos(\omega t) \quad (25)$$

$$G' = \frac{\tau_a'}{\gamma_a} \quad (26)$$

$$G'' = \frac{\tau_a''}{\gamma_a} \quad (27)$$

Onde G' , módulo de armazenamento, é uma medida da energia armazenada e recuperada em um ciclo, caracterizando um comportamento elástico; enquanto G'' , módulo de dissipação, representa a energia dissipada por ciclo, um comportamento de viscosidade do fluido (Chhabra e Richardson, 2008; Tarcha, 2014).

Substituindo as Equações 26 e 27 na Equação 25, temos a Equação 28, que inclui os termos G' e G'' :

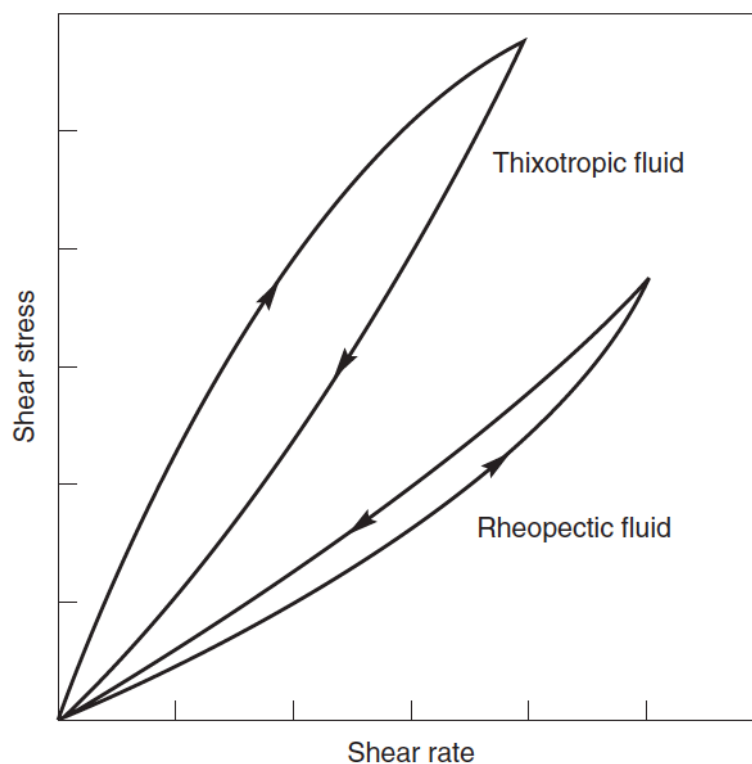
$$\tau(t) = G' \gamma_a \sin(\omega t) + G'' \gamma_a \cos(\omega t) \quad (28)$$

Os testes oscilatórios conduzidos a baixas deformações são conhecidos como testes na região *SAOS* (*Small Amplitude Oscillatory Shear*). Ao passo que as amplitudes de tensão ou deformação são incrementadas, é alcançada a região de escoamento conhecida por *LAOS* (*Large Amplitude Oscillatory Shear*). Com a continuidade do escoamento, deixando a região de viscoelasticidade linear em direção ao *LAOS*, verifica-se uma queda no valor de G' . Esse ponto de transição, segundo Webber (2001), caracteriza o início do escoamento. Habitualmente, estima-se a TLE como sendo o *crossover*, ponto no qual ocorre o cruzamento entre G' e G'' . Todavia, Bonn *et al.* (2015) salientam que as definições de G' e G'' são válidas dentro do regime de viscoelasticidade linear e no *crossover* o material já está no regime de viscoelasticidade não-linear. Assim, o entendimento do *crossover* como TLE deve ser feito com ponderação.

4.4.4. Ensaio de histerese

O último ensaio realizado foi o de histerese, que permite aferir a respeito da reversibilidade do material. É imposto um incremento crescente de taxa ou tensão e, ao atingir o valor máximo, com a estrutura do material completamente desestruturada, aplica-se um incremento decrescente até o valor inicial. Pelo comportamento da curva na etapa de incrementos decrescentes em relação a de incrementos crescentes, pode-se verificar se o material é tixotrópico ou reopético (Figura 27).

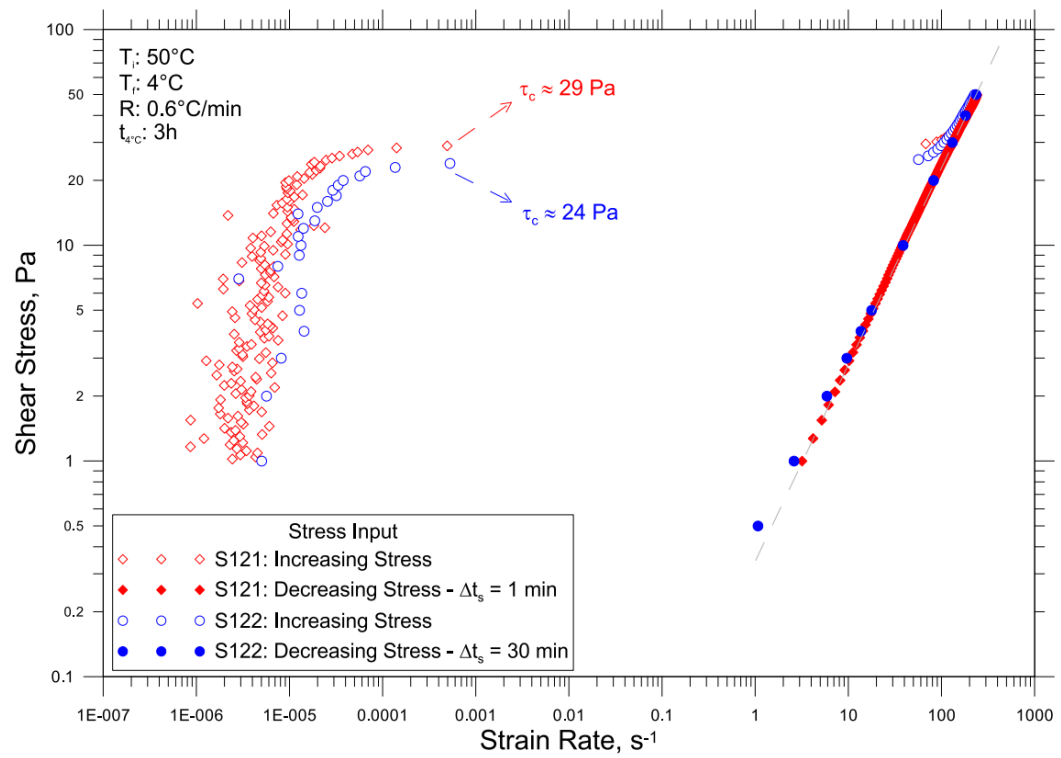
Figura 27 - Representações de testes de histerese para materiais tixotrópicos e reopéticos.



Fonte: Chhabra e Richardson (2008)

Tarcha *et al.* (2015) apresentam os resultados encontrados para amostras de óleo parafínico. Os resultados apontam que o material se mostrou completamente desestruturado, mesmo em baixos valores de tensão, e não houve reconstrução do material, ou seja, as forças de construção da estrutura são inferiores às de quebra (Figura 28).

Figura 28 – Testes de histerese em amostra de óleo parafínico.



Fonte: Tarcha *et al.* (2015)

CAPÍTULO 5

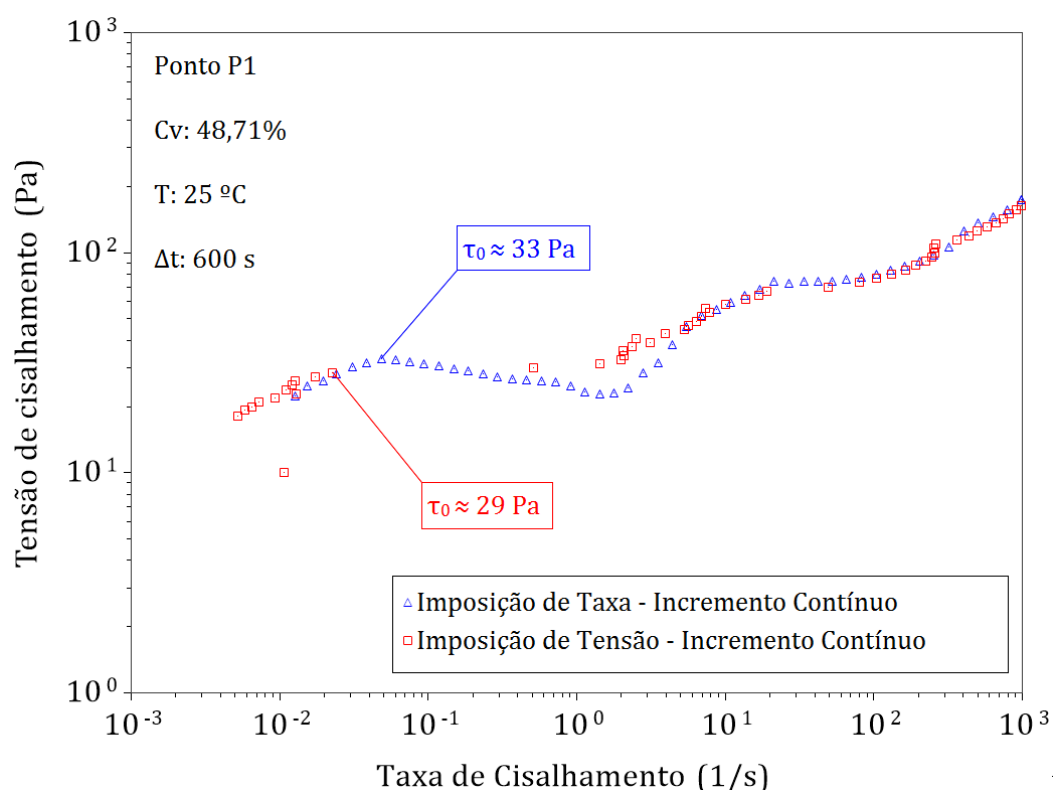
Resultados e discussão

5.1.

Ensaio de fluxo

As análises iniciais da TLE foram feitas a partir das curvas de fluxo, também identificando a diferença entre imposição de taxa e tensão. Nota-se que, após a quebra da estrutura, há uma significativa diferença no comportamento entre os dois ensaios. Ao se impor incrementos de tensão, os valores utilizados são sempre crescentes e resultam na completa desestruturação da amostra, caracterizada pela grande variação da taxa de cisalhamento para pequenos incrementos de tensão a partir da TLE. Como exemplo, na amostra de 48,71% do Ponto P1 (Figura 29) a taxa saltou da ordem de $0,02 \text{ s}^{-1}$ para 5 s^{-1} . Na imposição de taxa, conforme anteriormente relatado, o reômetro aplica tensões necessárias para obter as taxas desejadas. Sendo assim, após a quebra da estrutura o material perde resistência e a tensão aplicada é reduzida, implicando na quebra gradativa da estrutura. Ainda, as curvas obtidas por imposição de taxa e tensão se aproximam em altas taxas. Nessa região o material se encontra totalmente (ou quase totalmente) desestruturado e escoar como um fluido. Em contrapartida, há certa distinção dos resultados na região de baixas taxas, o que mostra a dificuldade do reômetro em trabalhar nesse intervalo.

Figura 29 - Comparação entre os ensaios de fluxo com imposição de taxa e tensão; Ponto P1, $C_v = 48,71\%$.



Fonte: Autor

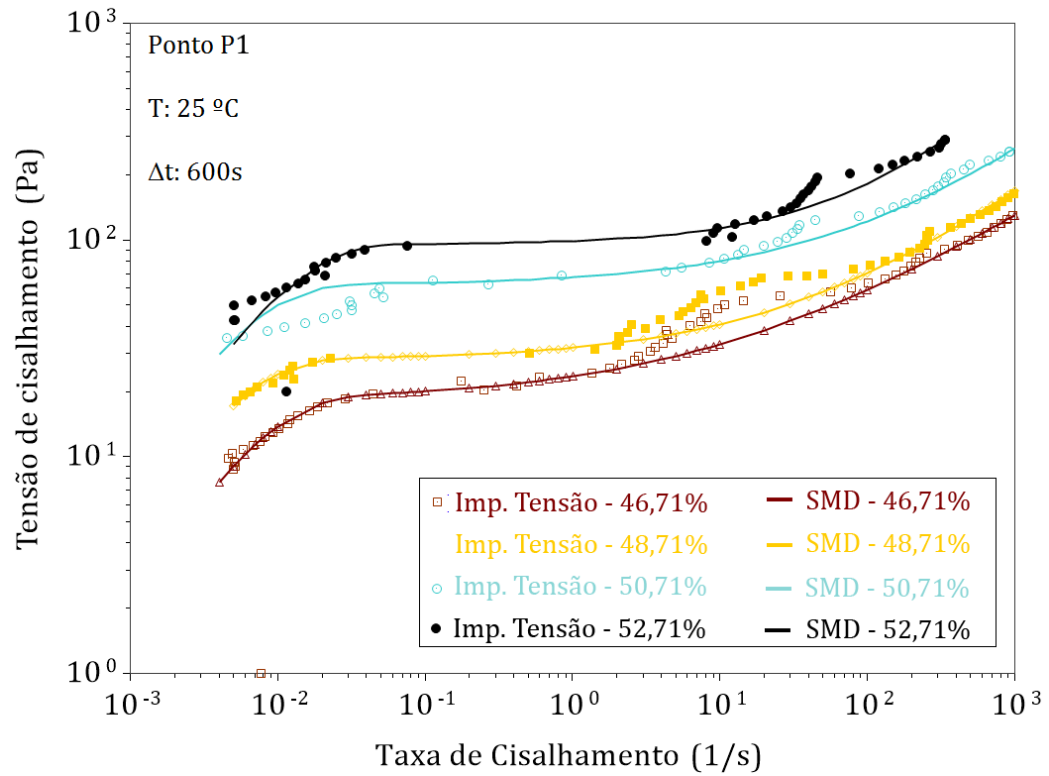
Buscou-se ajustar o modelo SMD (Souza Mendes e Dutra, 2004) às curvas obtidas por imposição de tensão (Tabela 9, Figura 30 e Figura 31). O maior desafio para tal tarefa foi em relação ao trecho *power-law*. Essa região não está bem caracterizada nas curvas de fluxo em virtude da existência de um segundo ponto de inflexão da curva. Ainda assim, considera-se que os ajustes foram razoáveis, sobretudo os do Ponto P2. A adequação do modelo mostra que, abaixo de τ_0 , o material pode ser compreendido como um fluido newtoniano de viscosidade muito elevada, porém finita.

Tabela 9 - Parâmetros do modelo SMD determinados para as diferentes amostras

Ponto	C_v (%)	τ_0 (Pa)	η_0 (Pa.s)	K (Pa.s ⁿ)	n
P1	46,71	18	$2,4 \times 10^3$	5,49	0,44
	48,71	26	$5,2 \times 10^3$	5,34	0,47
	50,71	62	$6,7 \times 10^3$	4,88	0,55
	52,71	95	$8,2 \times 10^3$	3,98	0,67
P2	48,87	14	$0,5 \times 10^3$	1,07	0,62
	50,87	18	$1,0 \times 10^3$	0,85	0,74
	52,87	29	$3,9 \times 10^3$	0,61	0,91
	54,87	72	$5,2 \times 10^3$	0,52	0,94

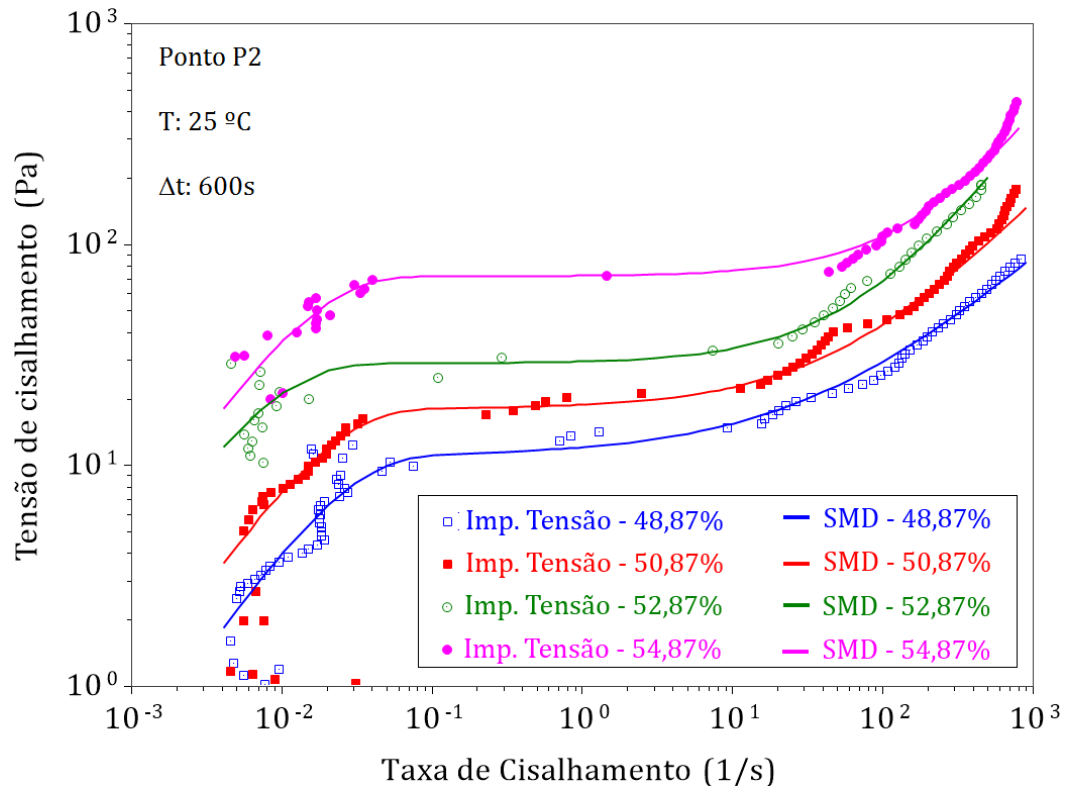
Fonte: Autor

Figura 30 - Curvas de fluxo do ponto P1 obtidas por imposição de tensão e ajustes pelo modelo SMD



Fonte: Autor

Figura 31 - Curvas de fluxo do ponto P2 obtidas por imposição de tensão e ajustes pelo modelo SMD



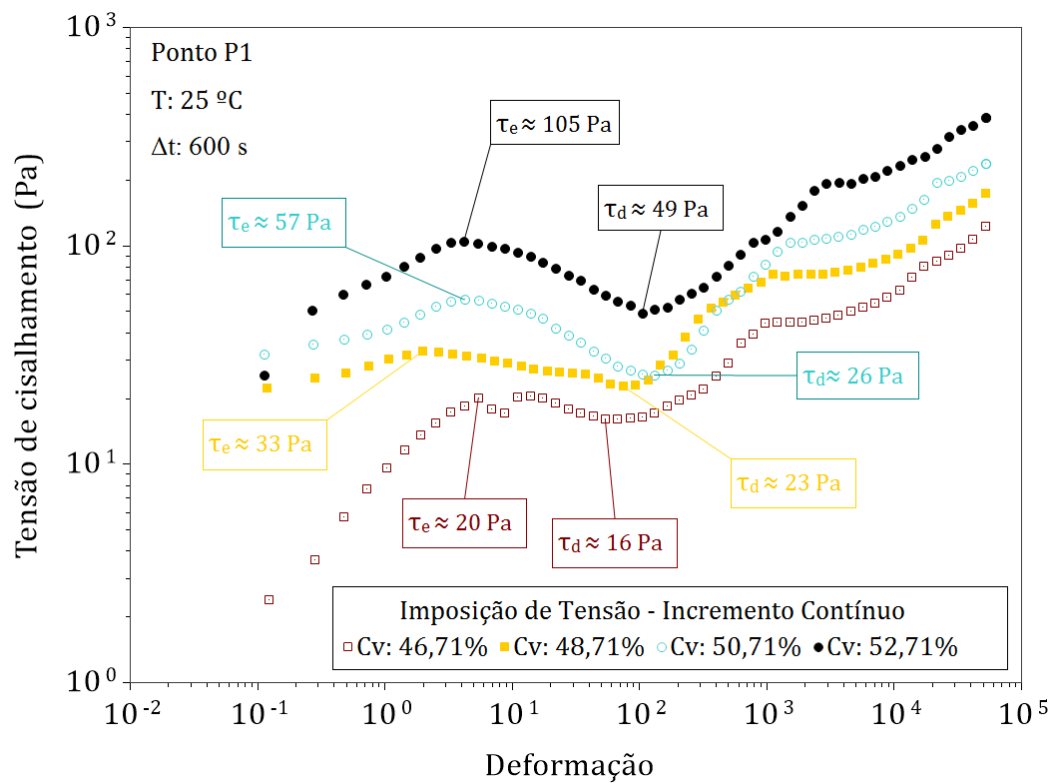
Fonte: Autor

5.2.

Relação entre tensão e deformação

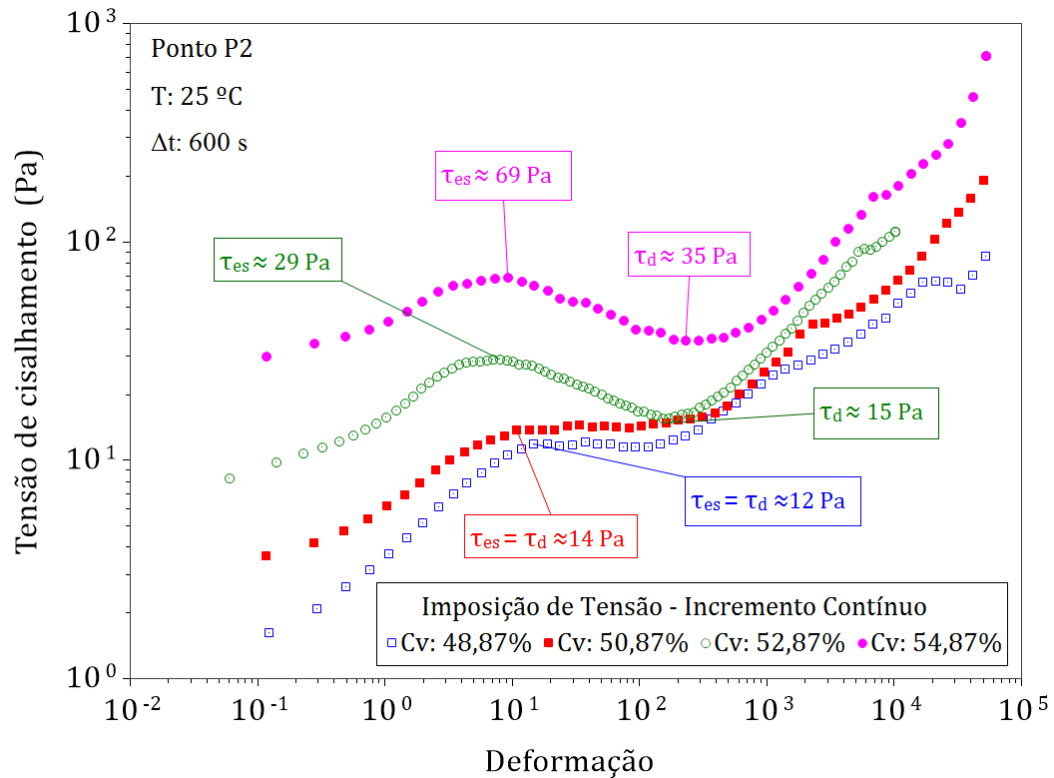
As curvas Tensão x Deformação (Figura 32 e Figura 33) demonstram a característica elástica do material. Para tensões abaixo de τ_0 , observa-se a relação linear entre as duas propriedades. Assim, pode-se também entender o material como um sólido elástico abaixo da TLE. As curvas, determinadas por imposição de taxa, se assemelham ao modelo proposto por Kraynik (1990 apud Bonneze e Brady, 1992). Assim, observa-se a presença das tensões limites estática e dinâmica, destacadas dentro nos gráficos.

Figura 32 - Curvas tensão x deformação do ponto P1 obtidas por incrementos contínuos de taxa



Fonte: Autor

Figura 33 - Curvas tensão x deformação do ponto P2 obtidas por incrementos contínuos de taxa



Fonte: Autor

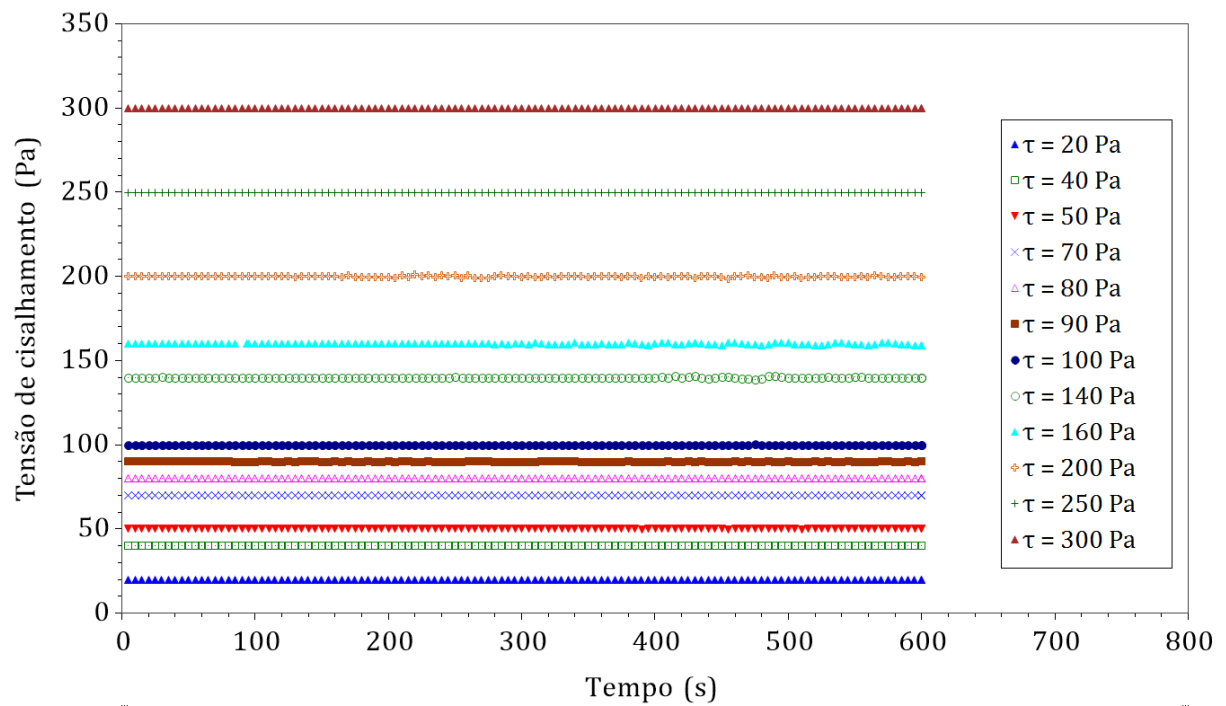
5.3.

Creep: resposta do material em função do tempo

O ensaio de fluência (*creep*) é o mais indicado para medir o valor de τ_0 por permitir avaliar a dependência com o tempo dos materiais. Coussout *et al.* (2002) aplicaram esse método em amostras de bentonita e constataram que existe uma bifurcação nas curvas de viscosidade em função do tempo. Se a tensão aplicada não for suficiente para provocar a quebra da estrutura, a deformação permanecerá constante ao longo do tempo, a taxa de cisalhamento tenderá a zero e, concomitantemente, a viscosidade tenderá a valores muito altos. Todavia, para tensões aplicadas acima da TLE do material, a deformação aumenta com o tempo, enquanto a taxa de cisalhamento e a viscosidade tendem a valores finitos constantes, indicando que o regime permanente foi alcançado. Outros autores também constataram esse comportamento em diferentes materiais. (Alicke, 2013; Tarcha *et al.*, 2015; Fernandes 2016).

A seguir, a Figura 34 mostra determinados valores de tensão medidos nos ensaios de fluência em comparação às tensões impostas. Percebe-se a boa medição em relação às tensões impostas, o que demonstra o bom controle do equipamento sobre essa variável.

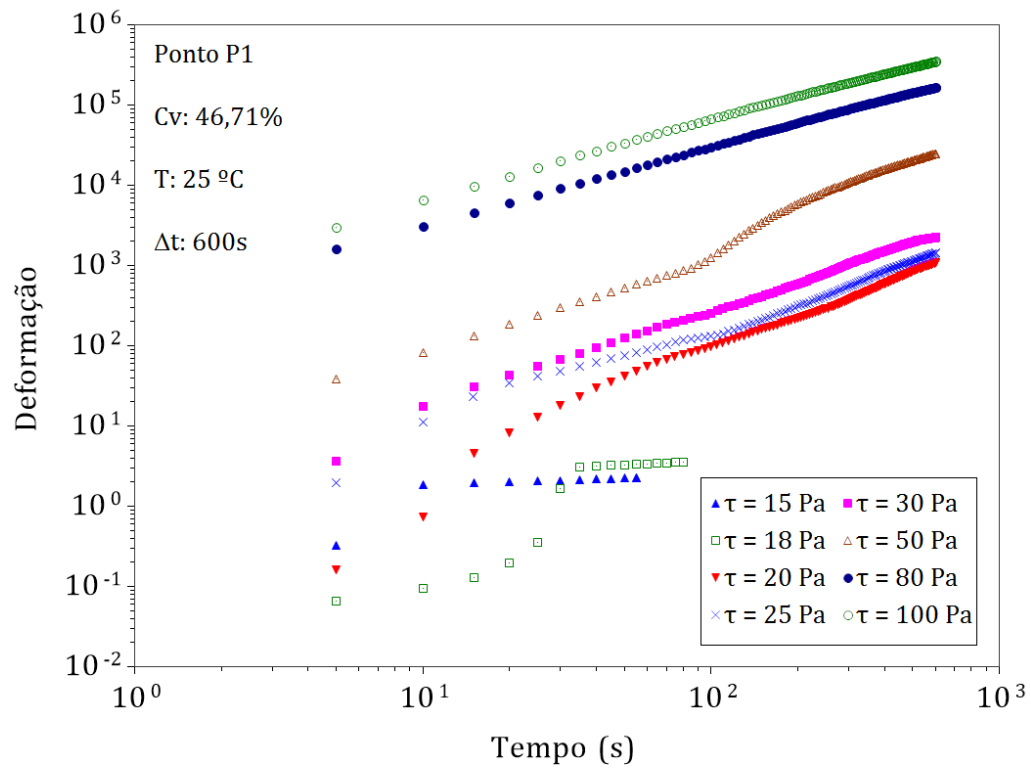
Figura 34 - Tensões de cisalhamento medidas ao longo do tempo para imposição de valores constantes de tensão



Fonte: Autor

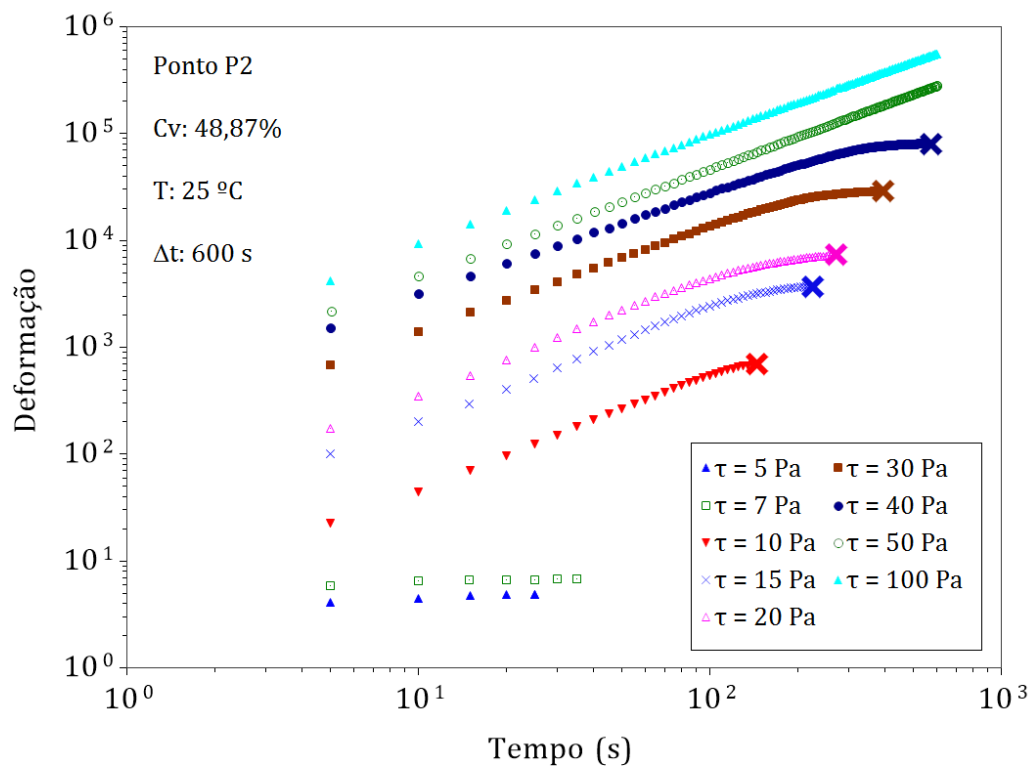
As Figura 35 a Figura 38 exemplificam deformações obtidas a partir diversos níveis de tensão impostos para diferentes concentrações volumétricas das amostras dos pontos P1 e P2. Em geral, a resposta registrada foi conforme o esperado descrito acima e pode ser associada ao modelo de Kelvin-Voigt. Abaixo da TLE, observa-se um valor constante da deformação, limitado pela parcela elástica.

Figura 35 - Deformação ao longo do tempo para tensões impostas (Ponto P1, $C_v = 46,71\%$)



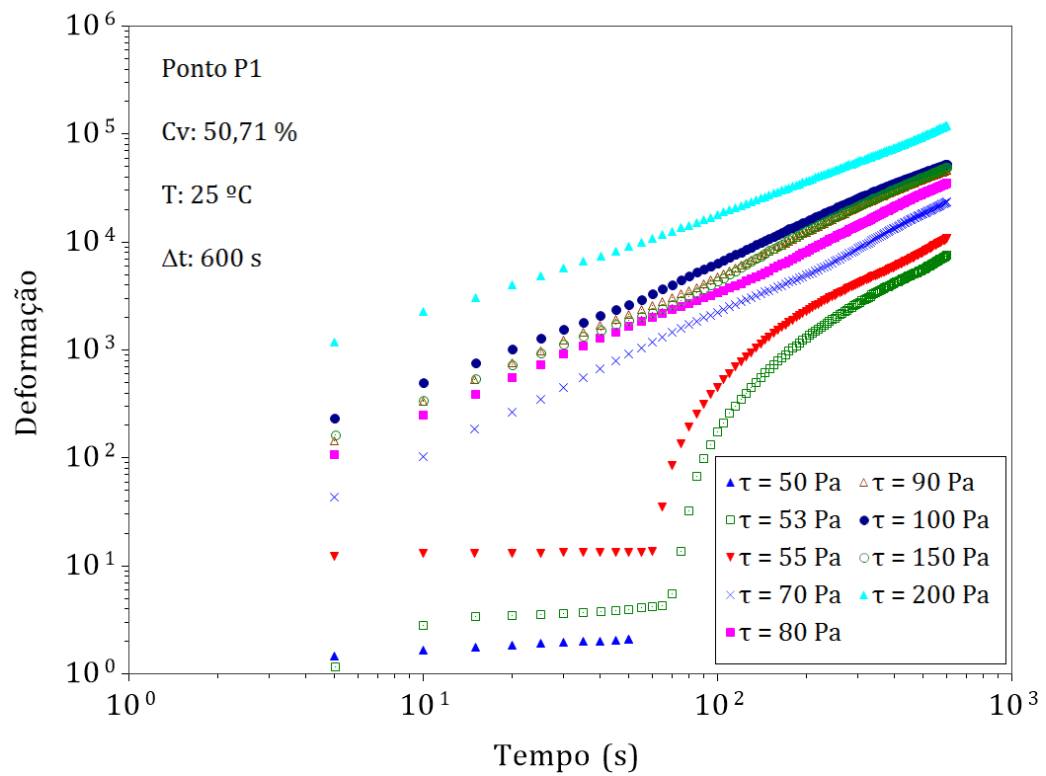
Fonte: Autor

Figura 36 - Deformação ao longo do tempo para tensões impostas (Ponto P2, $C_v = 48,87\%$)



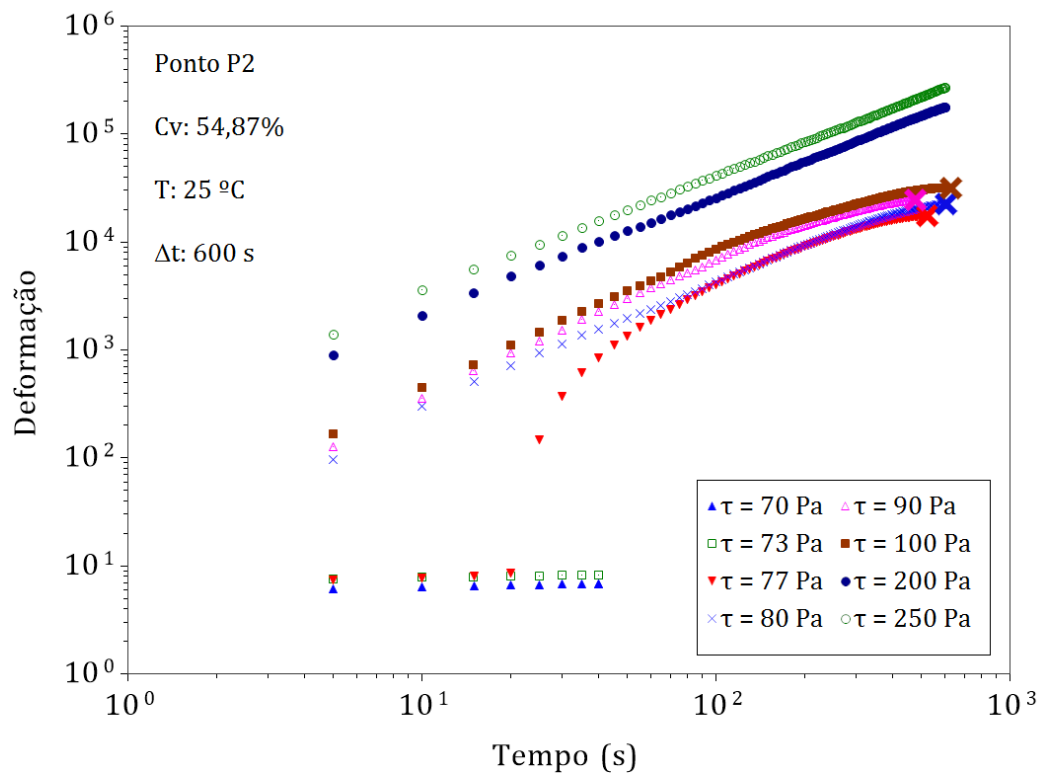
Fonte: Autor

Figura 37 - Deformação ao longo do tempo para tensões impostas (Ponto P1, $C_v = 50,71\%$)



Fonte: Autor

Figura 38 - Deformação ao longo do tempo para tensões impostas (Ponto P2, $C_v = 54,87\%$)



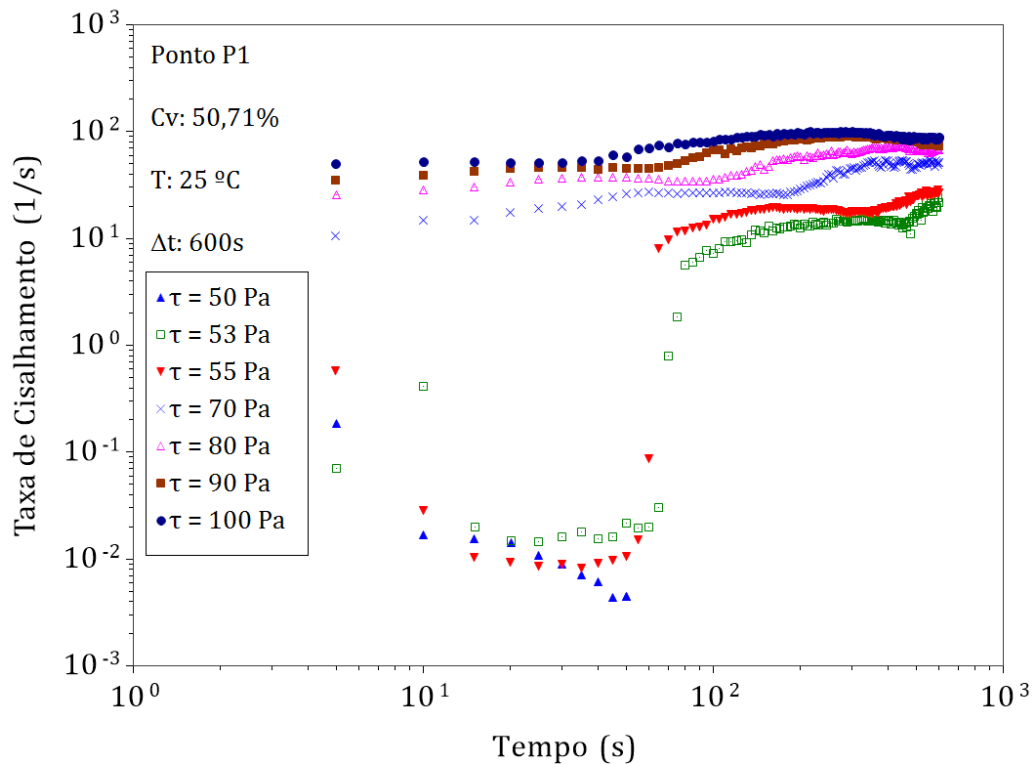
Fonte: Autor

Nota-se, todavia, um comportamento dependente do tempo de aplicação das tensões na amostra do P1 com $C_v = 50,71\%$ (Figura 37). Ao aplicar $\tau = 50$ Pa, a deformação foi constante, não sendo suficiente para quebrar a estrutura da amostra. A imposição de $\tau = 70$ Pa, porém, foi mais que suficiente para que isso ocorresse, visto que a taxa de cisalhamento tende a um valor constante. Assim, era evidente que a TLE estava nesse intervalo. A aplicação de $\tau = 55$ Pa também parecia não ser suficiente para provocar o escoamento do material. No entanto, mantida essa tensão, verificou-se a quebra da estrutura após 60 s. O mesmo ocorreu com $\tau = 53$ Pa, que resultou na quebra após 70 s. Se a aplicação da tensão fosse suspensa antes desse período, com 30 s, por exemplo, não seria possível verificar a quebra da estrutura. O mesmo foi observado na amostra com $C_v = 54,87\%$ do P2 (Figura 38). $\tau = 70$ Pa e $\tau = 73$ Pa não foram suficientes para quebrar a estrutura da amostra, enquanto com $\tau = 80$ Pa o escoamento ocorreu imediatamente. Mas para $\tau = 77$ Pa, a quebra ocorreu somente após 20 s.

As curvas das primeiras tensões aplicadas acima de τ_0 nas amostras do Ponto P2 mostram que, decorrido certo tempo, o fluxo foi interrompido antes do fim do teste, nos instantes marcados com um 'X' nos gráficos. Na amostra com $C_v = 48,87\%$, por exemplo, o fluxo foi interrompido com cerca de 160 s. Isso ocorre devido à sedimentação das partículas sólidas. No início do ensaio com $\tau = 10$ Pa, enquanto a amostra ainda se encontra bem homogênea, o material inicia o escoamento para o nível de tensão aplicado. Com o decorrer do tempo, a velocidade de rotação não é suficiente para manter as partículas em suspensão e elas se depositam no fundo do cilindro. Dessa maneira, a palheta não consegue vencer a resistência do material acumulado e o fluxo é interrompido. Para maiores valores de tensão, a velocidade de rotação do reômetro é suficiente para manter a homogeneização da amostra e o fluxo é mantido até o fim do teste.

O resultado de bifurcação do fluxo também pode ser visto ao plotar as taxas de cisalhamento em função do tempo (Figura 39). Abaixo da tensão de quebra, as tensões impostas resultaram em decréscimo da taxa de cisalhamento até valores próximos de zero, indicando que o fluxo foi interrompido. Tensões acima de τ_0 levaram ao regime permanente. Nota-se que foi possível medir a queda da taxa de cisalhamento, para todos os ensaios, até um valor mínimo em torno de 10^{-2} s^{-1} , como também visto no ensaio prévio com óleo de soja.

Figura 39 – Taxa de cisalhamento ao longo do tempo para tensões impostas (Ponto P1, $C_v = 50,71\%$)

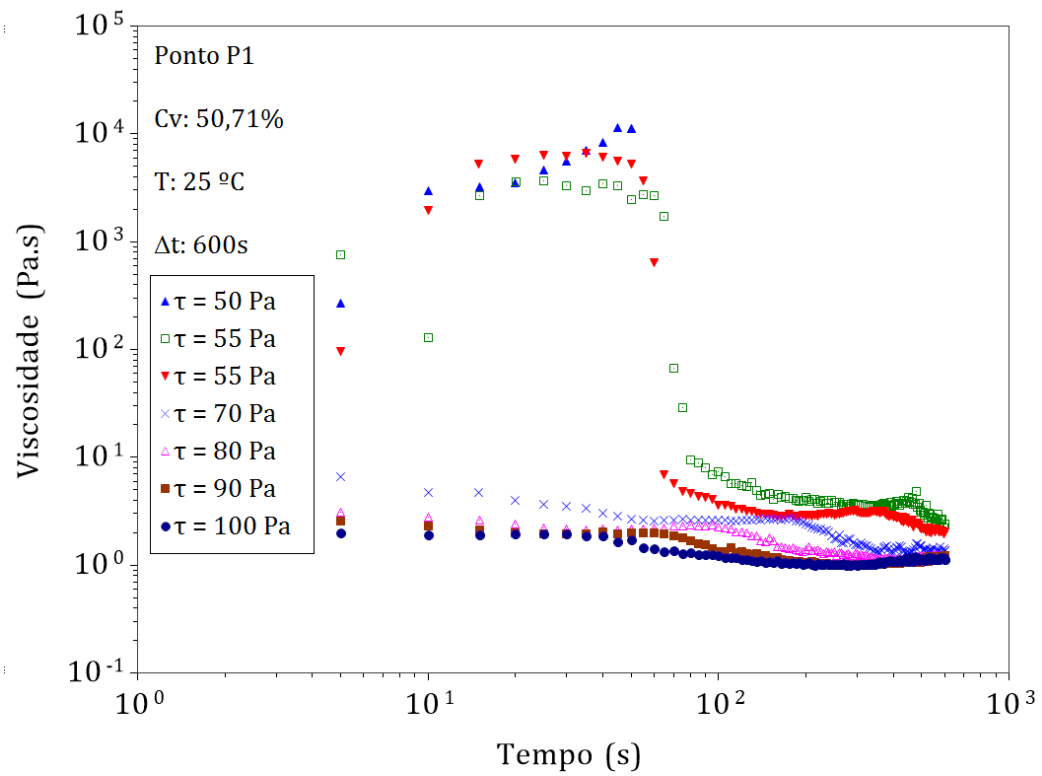


Fonte: Autor

Outra forma de compreender os resultados é observar o comportamento da viscosidade em função do tempo (

Figura 40). Como visto, abaixo de τ_0 o material pouco se deforma. Consequentemente, a viscosidade das amostras nesse intervalo tende a valores altíssimos. Após a quebra ocorre o inverso: o material escoar como um fluido e a viscosidade diminui, decrescendo conforme os valores das tensões impostas aumentam. Para o Ponto P2, em respaldo ao que se constatou pela análise da taxa de cisalhamento ao longo do tempo, níveis de tensão pouco acima da TLE não são suficientes para manter o regime permanente em decorrência da sedimentação das partículas sólidas.

Figura 40 - Viscosidade ao longo do tempo para tensões impostas (Ponto P1, $C_v = 50,71\%$)



Em síntese, as tensões limites pelos ensaios de fluência constam a seguir na Tabela 10.

Tabela 10 - TLEs obtidas pelos ensaios de fluência

Ponto 1		Ponto 2	
C_v (%)	τ_0 (Pa)	C_v (%)	τ_0 (Pa)
46,71	20	48,87	10
48,71	38	50,87	18
50,71	53	52,87	35
52,71	118	54,87	77

5.4.

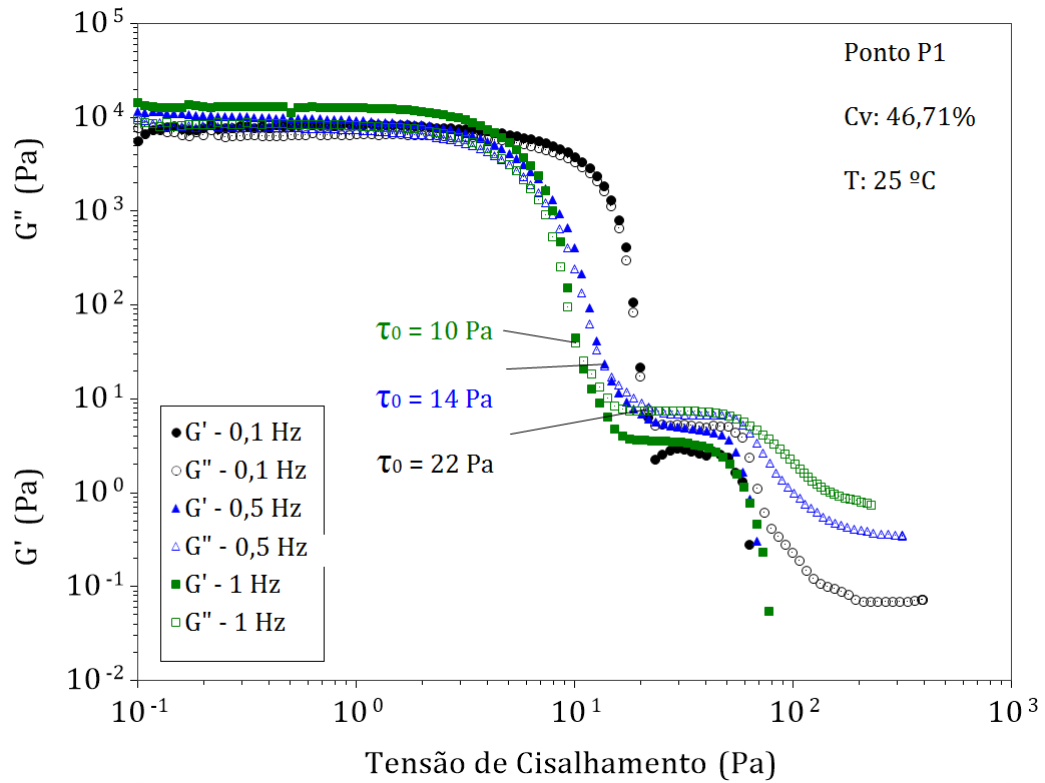
Comportamento viscoelástico por ensaios oscilatórios

O primeiro ensaio oscilatório realizado foi o de varredura de tensão (*stress sweep*). Foram impostas três frequências diferentes (0,1, 0,5 e 1 Hz) e uma faixa de amplitude de tensões de 0,01 Pa a 400 Pa para verificar o comportamento viscoelástico das amostras em amostras do Ponto P1 com concentrações de 46,71% e 50,71%.

Analizando as curvas (Figura 41 e Figura 42) constata-se que $G' > G''$ para uma ampla faixa das amplitudes de tensões, caracterizando a predominância do comportamento elástico do material. Ao se atingir o limite de viscoelasticidade linear, a curva de G' deixa de ser constante e decresce até se cruzar com a curva de G'' no ponto correspondente a tensão limite de escoamento. A partir desse ponto o material passa a escoar como um fluido.

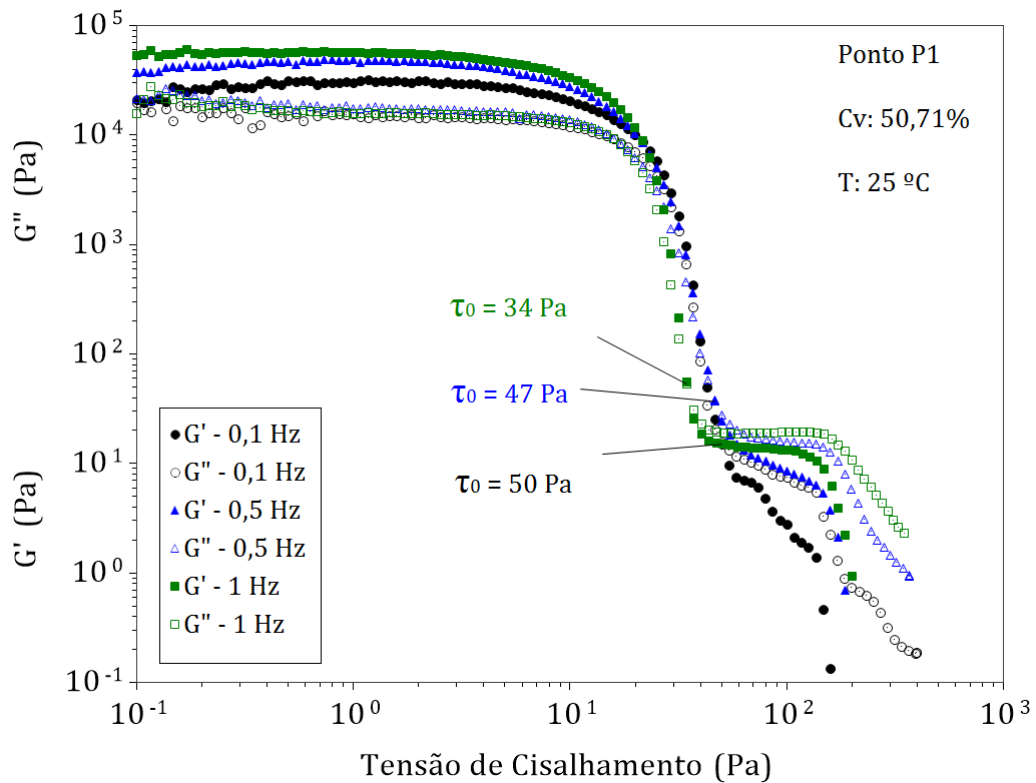
Com relação às diferentes frequências impostas, é perceptível que elas influenciam na medição da TLE. Os valores obtidos para $f = 0,1$ Hz se aproximam daqueles obtidos pelos ensaios de fluxo e fluência. O aumento da frequência resultou em valores de τ_0 mais baixos. Isso pode ser explicado pelo fato de que maior vibração durante o ensaio, em função da maior frequência, causa maior dano a estrutura do material. Comportamento similar foi verificado por Chang *et al.* (1998) em ensaios oscilatórios realizados em óleo parafínico.

Figura 41 - Varredura de tensão com frequências de 0,1, 0,5 e 1 Hz (Ponto P1, $C_v = 46,71\%$)



Fonte: Autor

Figura 42 - Varredura de tensão com frequências de 0,1, 0,5 e 1 Hz (Ponto P1, $C_v = 50,71\%$)



Fonte: Autor

Thompson *et al.* (2015) propõe que a aplicação do modelo de Jeffreys para ensaios do tipo *SAOStrain*, ou seja, com imposição de pequenos valores de amplitude de deformação. Assim, as equações do modelo podem ser ajustadas conforme a seguir:

$$\theta_1 = \frac{\eta_0}{G'} - \frac{G''}{G' \omega} \quad (29)$$

$$\theta_2 = \frac{G''}{G' \omega} - \frac{G'^2 + G''^2 G''}{\eta_0 G' \omega^2} \quad (30)$$

$$\eta_{J1} = \eta_0 - \frac{G''}{\omega} + \frac{G'^2}{\eta_0 \omega^2 - G'' \omega} \quad (31)$$

$$\eta_{J2} = \frac{G''}{\omega} - \frac{G'^2}{\eta_0 \omega^2 - G'' \omega} \quad (32)$$

$$G_J = G' \left[1 + \frac{G'^2}{(\eta_0 \omega - G'')^2} \right] \quad (33)$$

Para o caso de sólidos viscoelastoplásticos, que apresentam regime viscoelástico linear abaixo de τ_0 , como é o caso do rejeito estudado nesse trabalho, a viscosidade e o tempo de relaxação nessa região tendem ao infinito. Dessa maneira, as equações do modelo se reduzem a:

$$\theta_1 \rightarrow \infty \quad (34)$$

$$\theta_2 \rightarrow \frac{G''}{G'} \quad (35)$$

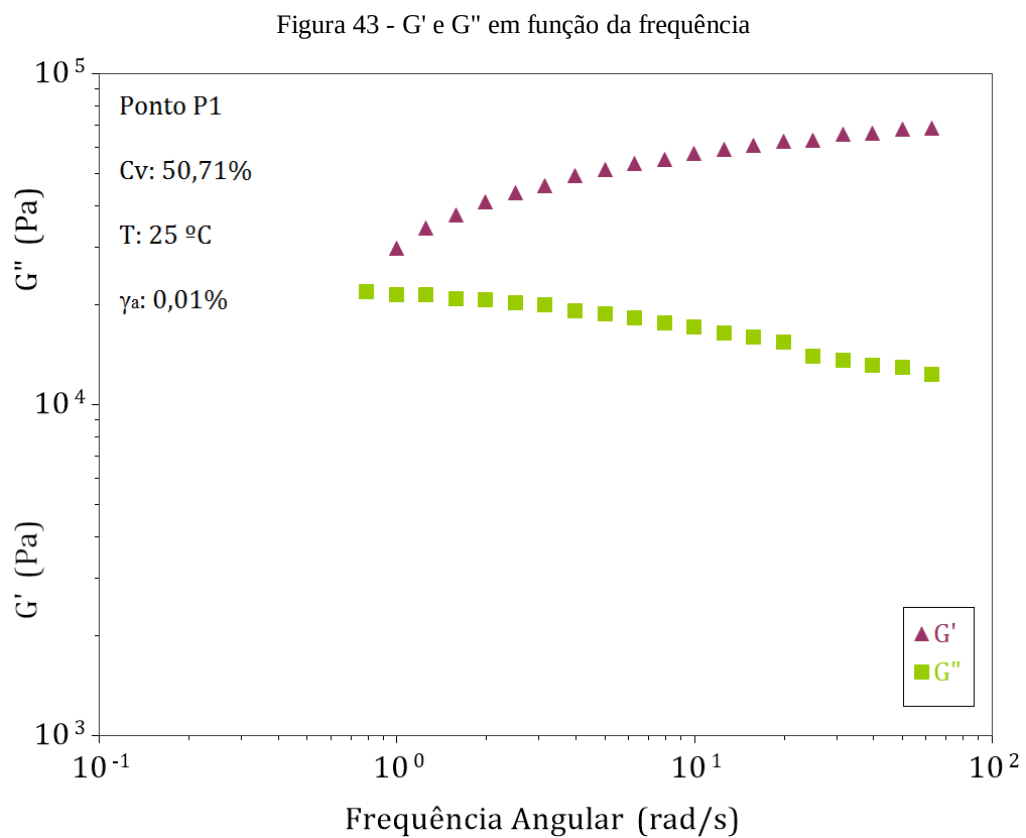
$$\eta_{J1} \rightarrow \infty \quad (36)$$

$$\eta_{J2} \rightarrow \frac{G''}{\omega} \quad (37)$$

$$G_J \rightarrow G' \quad (38)$$

Percebe-se que, nesse caso, o modelo de Jeffreys se reduz ao modelo de Kelvin-Voigt e as funções G_J e η_J às funções G' e η , respectivamente. Assim, o tempo de relaxação é infinito e o tempo de retardo decresce conforme a frequência é incrementada.

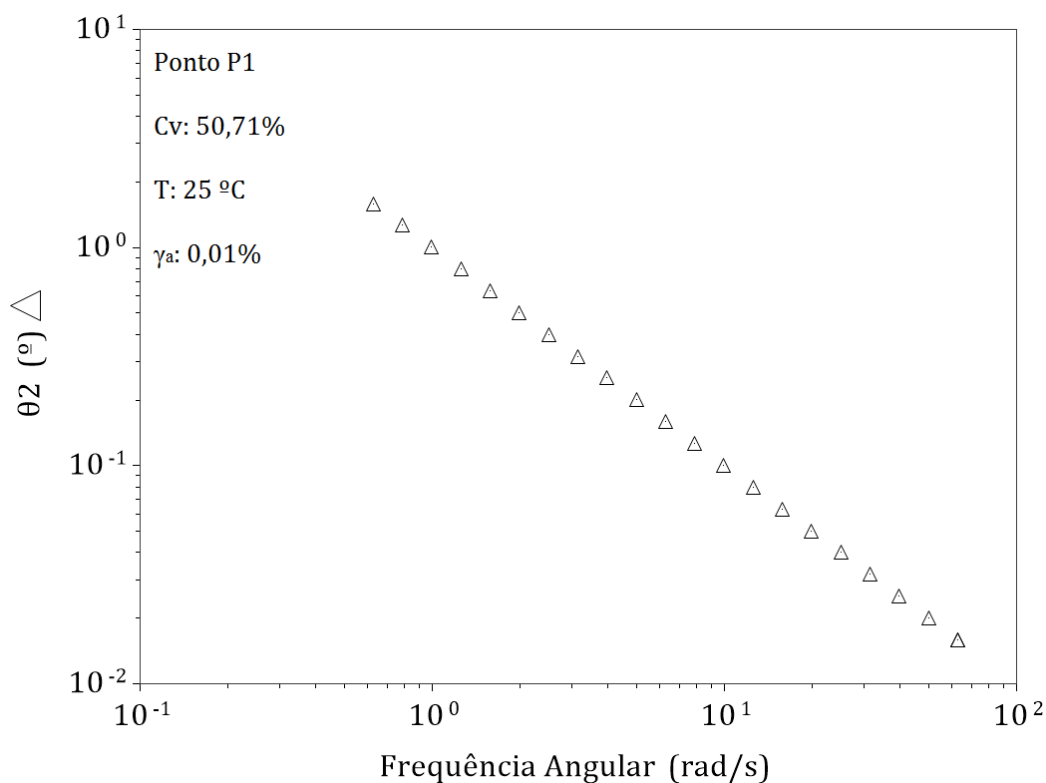
A Figura 43 apresenta o resultado de um ensaio de varredura de frequência (*frequency sweep*) na amostra do P1 com $C_v = 50,71\%$. Foi fixada uma pequena amplitude de deformação ($\gamma_a = 0,01\%$) para melhor avaliar a influência da frequência na região de viscoelasticidade linear.



Fonte: Autor

O tempo de retardo durante o ensaio decresce conforme o valor da frequência é incrementado (Figura 44). De acordo com Thompson *et al.* (2015), essa dependência da frequência implica que o material se aproxima de um sólido de Kelvin-Voigt quando o tempo característico dos estímulos é longo, e tende a responder de forma similar a um sólido hookeano quando o tempo característico do estímulo é reduzido.

Figura 44 - Tempo de retardo em função da frequência



Fonte: Autor

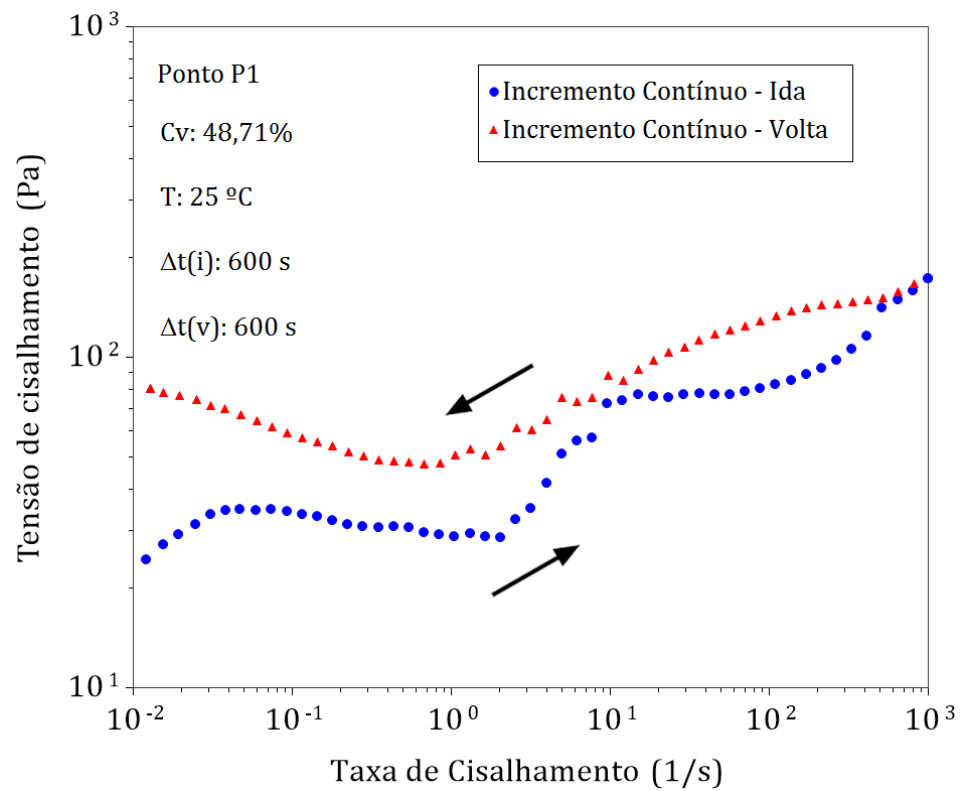
5.5.

Análise da reversibilidade do material

Os ensaios de histerese foram realizados impondo uma variação de taxa de $0,01 \text{ s}^{-1}$ a 1000 s^{-1} na primeira etapa e, ao atingir o valor máximo, as taxas eram decrescidas até o valor inicial.

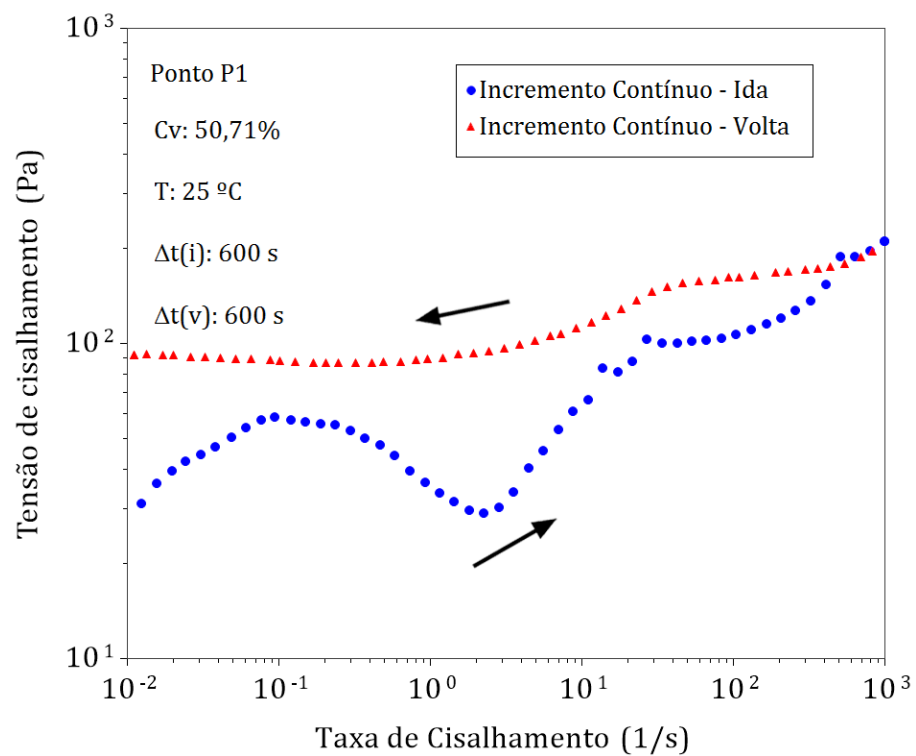
Duas concentrações do ponto P1 foram preparadas para os testes de histerese, 48,71% (Figura 45) e 50,71% (Figura 46). No decurso da etapa de redução, as tensões medidas foram maiores que na etapa de aumento das taxas. Usualmente, isso caracterizaria a reestruturação do material, ou seja, as forças internas de reconstrução superam as tensões de quebra. Não obstante, deve-se atentar para esse entendimento. O tempo total desse ensaio é de 1200 s, sendo a segunda metade correspondente a etapa de redução das taxas. Tendo em consideração o conhecimento das complicações relacionadas ao material, como sedimentação das partículas sólidas e evaporação de água, o ganho de resistência na etapa de redução pode ter sido influenciado por tais fatores.

Figura 45 – Curva de histerese obtida por imposição de Taxa de Cisalhamento (Ponto P1, $C_v = 48,71\%$)



Fonte: Autor

Figura 46 - Curva de histerese obtida por imposição de Taxa de Cisalhamento (Ponto P1, $C_v = 50,71\%$)



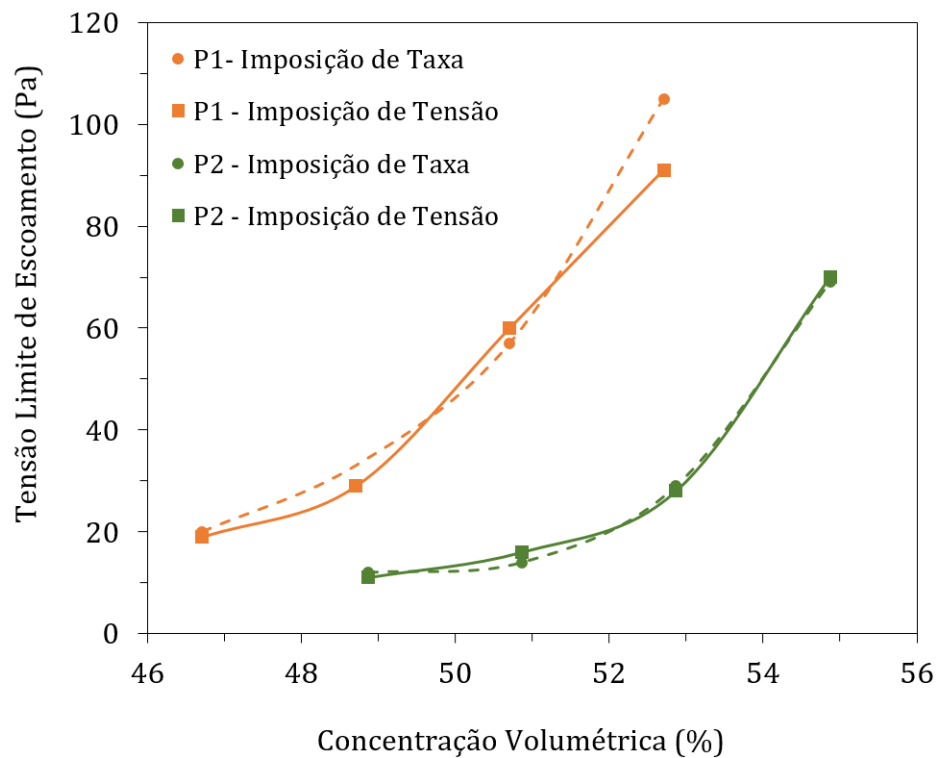
Fonte: Autor

5.6.

Tensão limite de escoamento em função da concentração volumétrica

Uma importante contribuição desse trabalho é servir de base para modelagens de propagação de ondas de ruptura do caso ocorrido. Para esse fim, as curvas de TLE em função da concentração volumétrica servem como base para os dados de entrada em alguns dos *softwares* comumente utilizados. A característica exponencial das curvas (Figura 47), obtidas com valores de concentração dentro de uma faixa usualmente encontrada em barragens de rejeitos, está de acordo com a curva observada por Boger (2013), anteriormente apresentada na Figura 3.

Figura 47 - TLE em função da concentração volumétrica



Fonte: Autor

CAPÍTULO 6

Considerações Finais

6.1. Conclusões

O presente trabalho trata de uma abordagem experimental para determinação do comportamento reológico, sobretudo da tensão limite de escoamento, do material desprendido da barragem de rejeitos de Fundão após sua ruptura, ocorrida em 2015. Foram estudadas quatro concentrações volumétricas distintas de amostras coletadas em três pontos a jusante da barragem, afastados em cerca de 20 km. Os ensaios reológicos foram realizados em um reômetro de tensão controlada, modelo AR 2000ex, utilizando a geometria *vane*. Diferentes métodos foram empregados para compreender o material reologicamente e determinar a TLE: curvas de fluxo, *creep*, *stress sweep*, *frequency sweep* e histerese.

Como conclusão geral de todos os ensaios, o material se mostrou altamente complexo, apresentando características viscoelastoplásticas. Quanto às diferentes amostras, as análises granulométricas mostram a alteração ocorrida durante o escoamento do material pelo curso d'água. Além disso, a partir dos ensaios reológicos foi constatado que, para uma mesma concentração em massa, a TLE do Ponto P2 é menor que do Ponto P1. Logo, percebe-se que rejeito desprendido da barragem apresentou modificações de suas características geotécnicas e reológicas, resultado das frações do material que ficaram depositados ao longo do trajeto e da mistura com outros tipos de materiais do rio. As características geotécnicas do material do Ponto P3 não permitiram a realização dos ensaios reológicos.

As TLEs obtidas pelos diferentes métodos (ensaios de fluxo por imposição de taxa e tensão, fluência e oscilatórios de tensão) resultaram em valores próximos, indicando satisfatória precisão na medição desse parâmetro. Entretanto, não foi possível obter correlações entre os limites de Atterberg e as TLEs do material. Em virtude da considerável presença de partículas

arenosas nos rejeitos estudados, os ensaios de limite de plasticidade e limite de liquidez foram inexecutáveis.

Embora o modelo de Bingham seja frequentemente utilizado para modelagem de propagação de ondas de ruptura, deve-se atentar para o fato de que o material se deforma para tensões abaixo da TLE. O ajuste pelo modelo SMD às curvas de fluxo se mostrou satisfatório, ainda que a existência de um segundo ponto de inflexão tenha dificultado o ajuste do trecho *power law*.

Os ensaios a tensão constante mostraram que o material se comporta como um sólido viscoelástico para $\tau < \tau_0$. Em algumas das amostras estudadas por esse método, verificou-se a dependência com o tempo: é necessária que a aplicação da tensão seja mantida por um certo intervalo de tempo para que ocorra a quebra da estrutura. Acima de τ_0 o material é praticamente independente do tempo, visto que a estrutura está completamente quebrada.

Dos ensaios oscilatórios do tipo *stress sweep* se percebeu que o *crossover* apresentou boa proximidade com a TLE obtida pelos demais métodos quando utilizada a frequência de 0,1 Hz. Para as maiores frequências, a tensão nesse ponto foi menor que a TLE, consequência da maior desestruturação causada pelo aumento da vibração. Ademais, o limite de viscoelasticidade linear ocorre bem antes de se atingir a tensão de quebra, mostrando que o material apresenta deformação não linear entre a tensão limite elástica e a estática.

O ensaio de varredura de frequência mostrou que a resposta do material na região de viscoelasticidade linear é sensível a variação desse parâmetro. Além disso, ao buscar o ajuste dos resultados pelo modelo de Jeffreys, a análise confirmou que o material se comporta como um sólido de Kelvin-Voigt.

Quanto aos testes de histerese, as curvas levam a crer que o material apresenta capacidade reconstrutiva: as tensões medidas durante os incrementos decrescentes são maiores que as da etapa de incrementos crescentes, algo característico de materiais reopéticos. Todavia, deve-se levar em conta os demais fatores envolvidos nesse ensaio. Fenômenos como evaporação da água e sedimentação podem influenciar nos resultados. A concentração de sólidos no fundo do cilindro, tornando o sistema bifásico, pode levar a maiores valores na medição de tensão.

A variação da tensão limite de escoamento em função da concentração volumétrica se mostrou coerente aos resultados encontrados na literatura para esse tipo de material, reforçando a validação dos métodos empregados.

6.2.

Sugestões para trabalhos futuros

- i. A padronização da homogeneização é um ponto crucial para a realização dos ensaios. Mudanças nessa etapa podem levar a alterações nas amostras, como diferenças no alinhamento das partículas. Por maior controle que se tivesse durante esta etapa, a homogeneização feita de forma manual não é ideal. Recomenda-se, para trabalhos posteriores, utilizar equipamentos específicos para esse fim, como dispersores ou misturadores mecânicos;
- ii. As curvas de fluxo apresentadas nesse trabalho foram obtidas por incrementos contínuos de taxa e tensão. Visto que o material se mostrou dependente do tempo, sugere-se realizar os ensaios de fluxo com imposição por passos para que se atinja o regime permanente em cada estágio;
- iii. Comparar os valores de τ_0 para o resíduo de minério de ferro obtidos pelos ensaios reológicos com as resistências de outros ensaios clássicos da mecânica dos solos, como o *vane* de bancada, o mini *vane* e o cone sueco.
- iv. Embora não tenha sido possível determinar os limites de consistência do material pelos ensaios tradicionais, o ensaio do cone sueco também permite a obtenção desses parâmetros. Dessa maneira, é possível tentar relacionar as TLEs com os limites pelo cone.
- v. A indústria mineradora vem utilizando materiais poliméricos para aumentar a velocidade de sedimentação das partículas sólidas das lamas e, assim, otimizar a capacidade da barragem. Uma proposta relevante é estudar a adição de polímeros às lamas com outro objetivo: redução de arraste no escoamento nos dutos que levam até o ponto de lançamento.

Referências Bibliográficas

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaio de compactação e ensaios de caracterização – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1986.

_____. *NBR 7181: Análise granulométrica de solos*. Rio de Janeiro, 1984.

_____. *NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro, 1984.

_____. *NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro, 1984.

_____. *NBR 7180: 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro, 1984.

ADIANSYAH, J.S.; ROSANO, M.; VINK, S.; KEIR, G.; STOKES, J.R. Synergising water and energy requirements to improve sustainability performance in mine tailings management. *Journal of Cleaner Production*, p.5-17, mai. 2016.

ALBUQUERQUE FILHO, L.H. *Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeito de minério de ferro através de ensaios de piezocone*. Ouro Preto, 2004. 192 p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.

ALICKE, A.A. *LAOS Rheological Characterization of an Elasto-Viscoplastic Material*. Rio de Janeiro, 2013. 88 p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

ANCEY, C.; BALMFORTH, N.J.; FRIGAARD, I. Viscoplastic fluids: From theory to application. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, special issue*, p.142, 2007.

ÁVILA, J.P. *Acidentes em barragens de rejeito no Brasil*. Disponível em: <<http://www.energia.sp.gov.br/wp-content/uploads/2016/07/ACIDENTES-EM-BARRAGENS-Joaquim-Pimenta-Pimenta-de-Ávila-Engenharia.pdf>>. Acesso em: 7 abr. 2017.

AZAM, S.; LI, Q. Tailings dam failures: A review of the last one hundred years. *Geotechnical News*, v. 28, p. 50–53, dez. 2010.

BARNES, H.A. Thixotropy – a review. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, v. 70, p. 1-33, 1997.

BARNES, H.A. A review of the slip (wall depletion of polymer solutions, emulsions and particle suspensions in viscometers: its cause, character and cure. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, v. 70, p. 1-33, mar. 1995.

BARNES, H.A. The yield stress – a review or 'παντα ρει' – everything flows? *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, v. 56, p. 221-251, feb. 1999.

BARNES, H.A.; HUTTON, J.F.; WALTERS, K. *An introduction to rheology*. Amsterdam: Elsevier Science, 1989, 199 p.

BARNES, H.A.; NGUYEN, Q.D. The use of the rotating vane geometry for non-Newtonian fluids – A review. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, v. 98, p. 1-14, 2001.

BINGHAM, E.C. An investigation of the laws of plastic flow. *Bulletin of the Bureau of Standards*. v. 13, p. 309–353, 1916.

BLAIR, G.S. *A Survey of General and Applied Rheology*. Londres: Pitman, 2 ed., 1949

BOGER, D.V. Rheology of slurries and environmental impacts in the mining industry. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, v. 4, p. 239-257, 2013.

BONN, D.; PAREDES, J.; DENN, M. M.; BERTHIER, L.; DIVOUX, T.; MANNEVILLE, S. Yield Stress Materials in Soft Condensed Matter. *arXiv*, v. 1502.05281, p. [cond-mat.soft], 18 fev. 2015.

BONNECAZE, R.T.; BRADY, J.F. Yield stresses in electrorheological fluids. *Journal of Rheology*, v. 36, n.1, p. 73-115, jan. 1992.

BRASIL. *Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010*. Brasília, 2010. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br>>. Acesso em: 10 abr. 2017.

CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL. *Rompimento de barragem da Mineradora Rio Pomba Cataguases afeta qualidade da água em MG e no RJ*. Texto disponibilizado em 18 jul. 2012. Disponível em: <<http://verbetes.cetem.gov.br/verbetes/ExibeVerbete.aspx?verid=107>>. Acesso em: 7 abr. 2017.

CHANG, C.; BOGER, D.V.; NGUYEN, Q.D. The yielding of waxy crude oils. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 37, p. 1551–1559, 1998.

CHHABRA, R.P.; RICHARDSON, J.F. *Non-Newtonian flow and applied rheology*. 2.ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2008, 518 p.

COSTA, A.V.; GUMIERI, A.G.; BRANDÃO, P.R.G. Piso intervalado produzido com rejeito de sinter feed. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 7, n. 2, p. 228-259, abr. 2014.

COUSSOT, P.; NGUYEN, Q.D.; HUYNH, T.; BONN, D. Viscosity bifurcation in thixotropic, yielding fluids. *Journal of Rheology*, v. 46, p. 573-589, mai./jun. 2001.

DAS, B. *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. 7. Ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. *Anuário mineral brasileiro: principais substâncias metálicas*. Brasília: DNPM, 2016. 31p.

DUARTE, A.P. *Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no Estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco*. Belo Horizonte, 2008. 116 p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais.

FEMA – Federal Emergency Management Agency. Federal guidelines for inundation mapping of flood risks associated with dam incidents and failures. Washington: FEMA, 2013.

FERNANDES, R.R. *Relação entre o limite de viscoelasticidade linear e o limite de escoamento de um material elastoviscoplástico*. Curitiba, 2016. 120 p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

G1. *Vistoria em barragem após tremor não apontou risco, diz mineradora*. Portal G1. Atualizado em 06/11/2015. Disponível em: <<http://g1.globo.com/minas-gerais/noticia/2015/11/vistoria-em-barragem-apos-tremor-nao-apontou-risco-diz-mineradora.html>>. Acesso em: 15 mar. de 2017

GUIMARÃES, N.C. *Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas*. Belo Horizonte, 2011. 14 p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais.

HERSCHEL, W. H.; BULKLEY, R. Konsistenzmessungen von gummi-benzollosungen. *Kolloid Zeitschrift*. v. 39, p. 291–300, 1926

HUNGR, O. A model for runout analysis of rapid flow slides, debris flow and avalanches. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 32, p. 610-623, 1995.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Área Territorial Brasileira*. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/default_territ_area.shtm>. Acesso em: 08 mar. 2017.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. *Produção Mineral Brasileira (PMB) – Série Histórica*. In: IBRAM. Disponibilizado em fev. 2017. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00006386.pdf>>. Acesso em: 17 mar. 2017.

IMTEAZ, B.; SHAHID, A.; SHIFULLAH, K.; PATRICK, L. Geotechnical behavior of uranium mill tailings from Saskatchewan, Canada. *International Journal of Mining Science and Technology*, v. 26, p. 369-375, mar. 2016.

JEONG, S.W.; Geotechnical and rheological characteristics of waste rock deposits influencing potential debris flow occurrence at the abandoned Imgi Mine, Korea. *Environmental Earth Sciences*, v. 73, p. 8299-8310, 2015.

JEYAPALAN, B.; JEY, K.J.; SEED, H.B. Analysis of flow failures of mine tailings dams. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 109, n.2, p. 150-171, 1983.

LOZANO, F.A.E. *Seleção de locais para barragens de rejeito usando o método de análise hierárquica*. São Paulo, 2006. 128 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

MACHADO, N.C. *Modelagem numérica de propagação de fluidos hiperconcentrados decorrentes de ruptura de barragens de rejeitos – Estudo de caso da Barragem de Fundão*. Belo Horizonte, 2017. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais.

MACHADO, N.C.; DIAS, N.A.; SALIBA, A.P.; SANTOS, B.B. A importância da reologia de minério de ferro – material típico de alteamento de barragens por montante. In: *Seminário de Gestão de Riscos e Segurança de Barragens de Rejeitos*, 2, 2017, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: CBDB, 2017. 1 pendrive.

MEZGER, T.G. *The Rheology Handbook*. 2.ed. Hannover: Vincentz Network, 2006, 299 p.

MOREIRA, B.A.; AROUCA, F.O.; DAMASCENO, J.J.R. Analysis of suspension sedimentation in fluids with rheological shear-thinning properties and thixotropic effects. *Powder Technology*, v. 308, p. 290-297, fev. 2017.

MORGENSTERN, N.R.; VICK, S.G.; VIOTTI, C.B.; WATTS, B.D. *Report on the immediate causes of the failure of the Fundão dam*. Fundão tailings dam review panel, 2016, 88 p.

O'BRIEN, J.S.; JULIEN, P.Y.; FULLERTON, W.T. Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 119, n.2, p. 244-261, 1993.

PASSOS, N.C.S.T. *Barragem de rejeito: avaliação dos parâmetros geotécnicos de rejeitos de minério de ferro utilizando ensaios de campo - um estudo de caso*. Curitiba, 2009. 93 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná.

RAFAEL, H.M.A.M. *Análise do potencial de liquefação de uma barragem de rejeito*. Rio de Janeiro, 2012. 103 p. Dissertação de Mestrado – Mestrado em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

RÉMY, J.P.P. Algumas considerações sobre as lições aprendidas com ruptura da barragem de Fundão um ano depois do acidente. In: *Seminário de Gestão de Riscos e Segurança de Barragens de Rejeitos*, 2, 2017, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: CBDB, 2017. 1 pendrive.

RIBEIRO, V.Q.F. *Proposta de metodologia para avaliação dos efeitos de rupturas de estruturas de disposição de rejeitos*. Belo Horizonte, 2015. 267 p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais.

RUSSO, F.M. Comportamento de barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico: caracterização laboratorial e simulação numérica do processo construtivo. Brasília, 2007. 295 p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília.

SCHAMBER, D.R.; MACARTHUR, R.C. One-dimensional model for mud flow. *Proc., ASCE specialty conference on hydr. and hydro. in the small comp. age*. v.2. ASCE, New York, N.Y., 1985. p. 1334-1339.

SCHAMBER, D.R.; MACARTHUR, R.C. Numerical methods for simulating mud flows. *Proc., International Symposium on River Sedimentation*, 3, 1986, University of Mississippi, Oxford, Mississippi, 1615-1623.

SOFRÁ, F.; BOGER, D.V. Environmental rheology for waste minimization in the mineral industry. *Chemical Engineering Journal*, v. 86, p. 319-330, 2002.

STRIVENS, T.A. An introduction to rheology. In: LAMBOURNE, R.; _____. 2.ed. *Painting and surface coatings*. Cambridge: Woodhead Publishing, 1999. cap. 14, p. 550-574.

TA Instruments. *AR-G2/AR 2000ex/AR 1500ex Operators Manual*. New Castle: TA Instruments, 2008, 216 p.

TARCHA, B.A.; FORTE, B.P.P.; SOARES, E.J.; THOMPSON, R.L. The elasto-viscoplastic-time-dependent nature of waxy crude oils. *Thermal Engineering*, v. 13, n. 2, p. 16-19, dez/2014.

TARCHA, B.A.; FORTE, B.P.P.; SOARES, E.J.; THOMPSON, R.L. Critical quantities on the yielding process of waxy crude oils. *Rheologica Acta*, v. 54, n. 6, p. 479-499, 2015.

TARCHA, B.A. *Desafios na medição da tensão limite de escoamento de óleos paraquínicos*. Vitória, 2014. 83 p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo.

THOMPSON, R.L.; ALICKE, A.A.; DE SOUZA MENDES, P.R. Model-based material functions for SAOS and LAOS analyses. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, v. 215, p. 19-30, 2015.

USGS – United States Geological Survey. *Mineral commodity summaries 2017*. Reston U.S. Geological Survey, 2017. 202p.

WATSON, A. Alternative tailing disposal - fact and fiction. *Paste Tailings Management – An International Mining Supplement*, p.3-4, abr. 2010.

WEBBER, R. M. Yield Properties of Wax Crystal Structures Formed in Lubricant Mineral Oils. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 40, p. 195–203, 2001.

WISE – World Information Service on Energy: Uranium Project. Atualizado em 3 abr. 2017. Disponível em: <<http://www.wise-uranium.org/mdaf.html>>. Acesso em 7 abr. 2017.